

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nikolai da Silva Espinoza

**Avaliação da ilha de calor urbana em Manaus com
dados observados *in situ* e sensoriamento remoto**

Campina Grande, Fevereiro de 2017.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA ILHA DE CALOR URBANA EM MANAUS COM
DADOS OBSERVADOS *IN SITU* E SENSORIAMENTO REMOTO**

NIKOLAI DA SILVA ESPINOZA

Campina Grande – PB

2017

NIKOLAI DA SILVA ESPINOZA

**AVALIAÇÃO DA ILHA DE CALOR URBANA EM MANAUS COM DADOS
OBSERVADOS *IN SITU* E SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: Micrometeorologia

Sub-área: Radiação e Sensoriamento Remoto

Orientadores: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos

Prof. Dra. Maria Betânia Leal de Oliveira

Campina Grande – PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- E77a Espinoza, Nikolai da Silva.
Avaliação da ilha de calor urbana em Manaus com dados observados IN SITU e sensoriamento remoto / Nikolai da Silva Espinoza. – Campina Grande, 2017.
68 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos, Profa. Dra. Maria Betânia Leal de Oliveira".
Referências.
1. Ilha de Calor Urbana. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Temperatura da Superfície. I. Santos, Carlos Antonio Costa dos. II. Oliveira, Maria Betânia Leal de. III. Título.

CDU 528.8(043)

NIKOLAI DA SILVA ESPINOZA

AVALIAÇÃO DA ILHA DE CALOR URBANA EM MANAUS COM DADOS
OBSERVADOS *IN SITU* E SENSORIAMENTO REMOTO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/02/2017

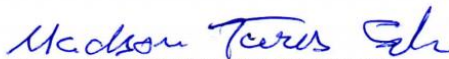
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Centro de Ciências Biológicas e Sociais Aplicadas
Universidade Estadual da Paraíba

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família materna e paterna, especialmente à minha mãe e pai, por todo incentivo, apoio e amor dado a mim durante a fase do mestrado, aos amigos e à minha companheira, Rosária Rodrigues.

AGRADECIMENTOS

A Deus, ao proporcionar novos aprendizados e experiências, para que eu possa aprender com os meus próprios erros.

À minha família e aos amigos pelos momentos felizes, harmoniosos e agradáveis que convivemos juntos e por toda motivação para seguir as provações da vida.

Aos professores do curso de Meteorologia da UFCG pelas aulas ministradas e agregação de conhecimentos na área, em especial ao meu orientador, prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos, pela orientação e ensinamentos durante o mestrado e a Dra. Maria Betânia Leal de Oliveira pela contribuição e disponibilização dos dados, coorientação e revisão deste trabalho.

À todas as amigadas que foram construídas durante o curso de meteorologia na graduação e mestrado, e que compartilharam com sugestões, conselhos, críticas, atividades e eventos dentro da minha história acadêmica.

À Rosária, por seu carinho, companheirismo e amor durante o mestrado.

À Arilene e Danilo por contribuir com informações voltadas ao curso de meteorologia e que são repassadas pela secretaria de Pós-graduação da UACA.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) por todo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

"Agradeço todas dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito".

Chico Xavier.

RESUMO

A ilha de calor urbana (ICU) é um fenômeno importante devido aos seus impactos diretos e indiretos sobre as populações humanas em ambientes urbanos. Esse fenômeno tem sido estudado amplamente usando tanto medições diretas a partir de sensores de temperatura do ar instalados em estações meteorológicas ou a bordo de veículos, como dados de temperatura da superfície medidos por sensoriamento remoto. Neste trabalho foi avaliada a variabilidade temporal e espacial da ICU na cidade de Manaus utilizando dados de precipitação, temperatura e umidade do ar em cinco estações meteorológicas distribuídas na área urbana e uma na área rural durante o período de julho de 2013 a julho de 2014. Adicionalmente, foram obtidas imagens do sensor OLI/TIRS a bordo do satélite Landsat 8 em quatro dias da estação menos chuvosa para estimar a temperatura da superfície e parâmetros de superfície, tais como o NDVI na área que estão inseridas as estações meteorológicas. Os resultados indicaram que a ICU atmosférica ocorre preferencialmente no período noturno, sendo mais intensa e condicionalmente desconfortável durante a estação seca da região. A partir das imagens de satélite, pode-se observar uma relação inversamente proporcional entre a temperatura da superfície e o NDVI, onde a maior variação de temperatura da superfície está localizada em áreas com pouca ou nenhuma vegetação.

Palavras-chave: Ilha de calor urbana, sensoriamento remoto, temperatura da superfície.

ABSTRACT

The urban heat island (ICU) is an important phenomenon due to its direct and indirect impacts on human populations in urban environments. This phenomenon has been studied extensively using both direct measurements from air temperature sensors installed in fixed weather stations or mobile surveys using automobiles and remotely measured surface temperature data. This work evaluated the temporal and spatial variability of ICU in the city of Manaus using precipitation, temperature and air humidity data in five meteorological stations distributed in the urban area and one in the rural area during the period from July 2013 to July 2014. In addition, images of the Landsat 8 OLI / TIRS satellite were obtained in four days of the less rainy season to estimate the surface temperature in the area comprising the meteorological stations. The results indicated that atmospheric ICU occurs preferentially at night, being more intense and conditionally uncomfortable during the dry season of the region. From the satellite images, an inversely proportional relationship between the surface temperature and the NDVI can be observed, where the highest surface temperature variation is located in areas with little or no vegetation.

Keywords: Urban heat island, remote sensing, surface temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de escalas de clima e camadas verticais encontradas em áreas urbanas. PBL – camada limite planetária, UBL – camada limite urbana, UCL – camada de cobertura urbana [modificado a partir de Oke, 1997].....	5
Figura 2. a) Mapa da região Norte do Brasil com a localização em destaque do município de Manaus. b) Mapa do município de Manaus com a localização em destaque para zonas urbanas da cidade. c) Distribuição espacial das estações automáticas Onset/REMCLAM em Manaus e áreas adjacentes.....	13
Figura 3. (a) Temperature/RH Smart Sensor (S-TH-M00x) e (b) Rain Gauge Smart Sensor.....	14
Figura 4. Diagrama ilustrativo das etapas destinadas à obtenção da temperatura da superfície.....	22
Figura 5. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de janeiro de 2014.....	26
Figura 6. Variabilidade diária da precipitação a cada 5 minutos para o mês de janeiro de 2014.....	26
Figura 7. Comparação da média horária da ICU para o mês de janeiro de 2014 entre as estações urbanas CMM (a), EST (b), IFAM (c), INPA (d) e Policlínica (e) e a estação Embrapa (rural).....	28
Figura 8. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de fevereiro de 2014.....	29

Figura 9. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de fevereiro de 2014.....	29
Figura 10. Comparação da média horária da ICU para o mês de fevereiro de 2014 entre as estações urbanas CMM (a), EST (b), IFAM (c), INPA (d) e Policlínica (e) e a estação Embrapa (rural).....	30
Figura 11. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de agosto de 2013.....	32
Figura 12. Variabilidade diária da precipitação a cada 5 minutos para o mês de agosto de 2013.....	32
Figura 13. Comparação da média horária da ICU para o mês de agosto de 2013 entre as estações urbanas CMM (a), IFAM (b) e Policlínica (c) e a estação Embrapa (rural).....	33
Figura 14. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de setembro de 2013.....	35
Figura 15. Variabilidade diária da precipitação a cada 5 minutos para o mês de setembro de 2013.....	35
Figura 16. Comparação da média horária da ICU para o mês de setembro de 2013 entre as estações urbanas CMM (a), IFAM (b) e Policlínica (c) e a estação Embrapa (rural).....	36
Figura 17. Distribuição espacial da temperatura da superfície (a), NDVI (b) para o dia 19 de julho de 2013, (c) e (d) para o dia 6 de julho de 2014 nas seis estações distribuídas na cidade e seu entorno. ► – Embrapa, ▲ – IFAM, ■ – INPA, ★ – EST, ● – Policlínica e ● – CMM..	44

Figura 18. Distribuição espacial da temperatura da superfície (a), NDVI (b) para o dia 10 de agosto de 2015, (c) e (d) para o dia 11 de setembro de 2015 nas seis estações distribuídas na cidade e seu entorno. ► – Embrapa, ▲ – IFAM, ■ – INPA, ★ – EST, ● – Policlínica e ● – CMM.....45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações técnicas do sensor Rain Gauge Smart Sensor.....	15
Tabela 2. Especificações técnicas do sensor Temperature/RH Smart Sensor.....	16
Tabela 3. Localização e período de dados das estações automáticas Onset/REMCLAM.....	17
Tabela 4. Resumo das informações contidas nos metadados das imagens.....	18
Tabela 5. Classificação do índice de desconforto.....	20
Tabela 6. Gradientes térmicos mensais (ΔT) (em °C) entre as estações urbanas e rural (Embrapa) entre julho de 2013 a julho de 2014.....	38
Tabela 7. Avaliação do índice de desconforto térmico (ID) (em °C) durante julho a dezembro de 2013.....	39
Tabela 8. Avaliação do índice de desconforto térmico (ID) (em °C) durante janeiro a julho de 2014.....	40
Tabela 9. Avaliação do índice de desconforto térmico (ID) (em °C) para o dia 19 de setembro de 2013 (a) e 20 de fevereiro de 2014 (b) durante o período noturno e diurno.....	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB – Alta da Bolívia

CCMs – Complexos Convectivos de Meso Escala

CCU – Camada de Cobertura Urbana

CLU – Camada Limite Urbana

CMM – Colégio Militar de Manaus

DN – *Digital Number*

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EST – Escola Superior de Tecnologia

ETM+ – *Enhanced Thematic Mapper Plus*

GEE – Gases de Efeito Estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICU – Ilha de Calor Urbana

ID – Índice de Desconforto Térmico

IFAM – Instituto Federal do Amazonas

IICU – Intensidade da Ilha de Calor Urbana

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

IAF – Índice de Área Foliar

LIs – Linhas de Instabilidade

MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

OLI – *Operational Land Imager*

REMCLAM – Rede de Mudanças Climáticas da Amazônia

RH – *Relative Humidity*

ROL – Radiação de Onda Longa

SAVI – *Soil Adjusted Vegetation Index*

Tar – Temperatura do Ar

TE– Temperatura Efetiva

TIR – *Thermal Infrared*

TIRS –*Thermal Infrared Sensor*

TM – *Thematic Mapper*

Tr – Temperatura na Área Rural

Ts – Temperatura da Superfície

Tu – Temperatura na Área Urbana

UR – Umidade Relativa

USGS – *U.S Geological Survey*

WMO – *World Meteorological Organization*

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

ZFM – Zona Franca de Manaus

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2.1 Principais características do efeito de ICU no contexto de clima urbano	4
2.2 Ilha de calor urbana atmosférica (estudos observacionais)	6
2.3 Ilha de calor urbana em superfície (sensoriamento remoto)	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1 Material	12
3.1.1 Área de estudo	12
3.1.2.1 Dados de superfície	14
3.1.2.2 Dados orbitais	17
3.2 Metodologia	18
3.2.1 Intensidade da ilha de calor urbana (IICU)	18
3.2.2 Índice de Desconforto térmico	19
3.2.3 Processamento digital das imagens	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Variabilidade diária e horária da ICU	26
4.2 Intensidade da ilha de calor urbana (IICU) e Índice de Desconforto (ID)	37
4.3 Variabilidade espacial da temperatura da superfície	41
5. CONCLUSÕES	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

Ultimamente, vários estudos têm focado suas atenções no aquecimento global observando o comportamento da temperatura média do ar no presente para avaliar o impacto desta variável e projetar tendências para um cenário futuro. Simulações com modelos climáticos indicam que o aumento da temperatura nos últimos anos é proveniente de atividades humanas, como consequência do aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e mudanças no uso do solo (Nobre *et al.*, 2012), diretamente relacionados com o desenvolvimento econômico e crescimento populacional nos centros urbanos.

Um aspecto bastante comum nas grandes cidades é o microclima urbano, o qual pode ser entendido a partir de alterações das condições atmosféricas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, padrões de vento etc) entre a cidade e o seu entorno. Dentro do contexto urbano, o processo de urbanização gera alterações significativas no microclima de uma cidade, tanto em superfície, a partir de mudanças no uso/cobertura do solo (Kaya *et al.*, 2012), como também na atmosfera através da redução do escoamento do ar próximo a superfície, diminuição da evapotranspiração, aumento da poluição, criando assim uma perturbação no clima local. Um exemplo típico de microclima urbano nas cidades é o fenômeno da ilha de calor urbana (ICU).

De acordo com Azevedo *et al.* (2016), as ICU continuam a ser um fenômeno amplamente pesquisado a partir de diferenças na temperatura entre uma área urbana (T_u), em relação à área rural (T_r) ou suburbana vizinha ($\Delta T_{u-r} = T_u - T_r$). Neste sentido, a formação da ICU mostra-se como um forte indicador dos efeitos da área urbana sobre o clima local. Existem uma série de fatores que contribuem com a distribuição e a intensidade das ICU, tais como o tamanho da cidade, população, hora do dia, estação do ano, efeitos térmicos induzidos por diferenças de temperatura nos edifícios, entre outros. A combinação de todos estes

fatores pode criar um novo clima urbano, onde as principais causas podem ser atribuídas à alta capacidade calorífica dos materiais de construção, retenção da radiação de onda longa por parte da poluição atmosférica, entre outros (Richardson, 2015).

A disponibilidade de radiação que pode ser obtida através do balanço de radiação é um dos principais fatores que determinam o clima na região Amazônica. Devido aos elevados valores de energia solar que incidem na superfície, o comportamento da temperatura do ar mostra uma pequena variação ao longo do ano (Cavalcanti *et al.*, 2009). Em Manaus, a variação sazonal da temperatura do ar é modulada pelo regime de precipitação, o qual apresenta dois períodos distintos, um com os maiores totais pluviométricos de fevereiro a abril e outro, menos chuvoso, ocorrendo no trimestre julho, agosto e setembro. Entre 1961 e 2008, Souza e Alvalá (2010) mostraram que durante o período chuvoso, o mês de março obteve a menor temperatura média do ar, aproximadamente 26,1 °C.

Um dos primeiros trabalhos a estudar ICU em Manaus foi proposto por Maitelli e Wright (1996), que analisaram o efeito da ICU comparando dados de temperatura do ar dentro do centro urbano com áreas rurais (floresta e pastagem) para os meses chuvosos e menos chuvosos entre o período de 1991 a 1992. A partir do desenvolvimento de uma metodologia para intensidade da ICU, foi verificado que a intensidade média da ICU obteve maior valor dentro do perímetro urbano do que as áreas rurais para todo período de estudo. Eles perceberam, também, que em setembro, mês que apresenta os maiores valores de temperatura máxima, a maior intensidade foi observada no período da manhã. Um estudo mais recente mostrou que a intensidade da ICU na cidade de Manaus obteve maiores (menores) valores em setembro (janeiro) entre o período 2000 a 2008 (Souza e Alvalá, 2012). Alguns estudos por sensoriamento remoto em Manaus têm utilizado as plataformas Landsat (Santos e Lima, 2013; Rafael, 2014) e MODIS (Corrêa, 2013) para determinar a ICU na cidade.

A expansão urbana de Manaus, capital do Amazonas, localizada sobre as coordenadas de 3° 9' e 2° 58' de latitude Sul e 60° 7' e 59° 47' de longitude Oeste, começou a acelerar com o surgimento de um modelo de desenvolvimento econômico a partir da implantação de um polo industrial conhecido como Zona Franca de Manaus (ZFM) no início de 1967. Isto acabou gerando bastante migração do interior do Estado, assim como de outras cidades em busca de novas oportunidades de trabalho. De acordo com o IBGE (2016), atualmente a população da cidade está estimada em 2.094.391 habitantes produzindo um grande crescimento desordenado, aumentando o número de bairros periféricos e consequentemente contribuindo com a formação de ICU na cidade.

Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho é fazer uma combinação de medições de temperatura do ar a partir de estações meteorológicas instaladas em superfície e de temperatura da superfície estimadas por sensoriamento remoto orbital para avaliar a ilha de calor urbana na cidade de Manaus. Especificamente, procurou-se:

1. Observar a variabilidade diária e horária da temperatura do ar para identificar ICU em diferentes zonas da cidade;
2. Analisar a Intensidade da ilha de calor urbana (IICU) e o Índice de Desconforto (ID) térmico em Manaus através da temperatura e umidade relativa do ar em áreas distintas (áreas com menor ou maior quantidade de edifícios, área vegetada, etc);
3. Estimar parâmetros de superfície (NDVI, emissividade, etc) para obter a temperatura da superfície a partir de imagens do Landsat 8;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Principais características do efeito de ICU no contexto de clima urbano

Uma característica distinta do clima urbano é a formação das ICU, o qual a sua interpretação depende das observações em várias escalas agregadas. De acordo com Arnfield (2003), estudos sobre as ICU podem ser divididos em três tipos diferentes: na superfície, na camada de cobertura urbana (CCU) e na camada limite urbana (CLU). O aspecto fundamental para a questão da escala é a distinção entre a CCU e a CLU. Na CCU (aproximadamente do solo ao nível do telhado), processos de troca de fluxo de ar e energia são controlados por microescala, pelas características e por processos específicos do lugar. A CLU acima do nível do telhado é a parte da camada limite planetária cujas características são afetadas pela presença da superfície urbana e fenômenos de escala local e mesoescala são controlados por processos que operam em escalas espaciais e temporais maiores.

As ICU na CCU normalmente são detectadas por sensores instalados nos locais, no padrão de altura meteorológico ou em sensores fixados em veículos. Entretanto, as características climáticas na CLU também são afetadas pela presença da superfície urbana. Observações de ICU na CLU são feitas a partir de plataformas de sensores mais especializados, tais como torres micrometeorológicas, radiossondagens ou içamento de balão cativo, ou a partir de instrumentos a bordo de aeronaves.

Estas observações podem ser verificadas através da ICU em superfície mostrando a diferença de temperaturas da superfície entre a área urbana e rural, e pela ICU atmosférica verificando diferenças correspondentes na temperatura do ar. As características básicas entre as ICU atmosférica e na superfície são bem distintas. A ICU atmosférica ocorre geralmente no

período noturno, sendo muitas vezes fraca no final da manhã e durante todo o dia. Por outro lado, a ICU em superfície apresenta uma maior variabilidade espacial, sendo mais intensa no período diurno. Embora as temperaturas de superfície mostrem alguns padrões espaciais e temporais semelhantes às da temperatura do ar, esta correspondência não é exata (Dwivedi e Khire, 2014).

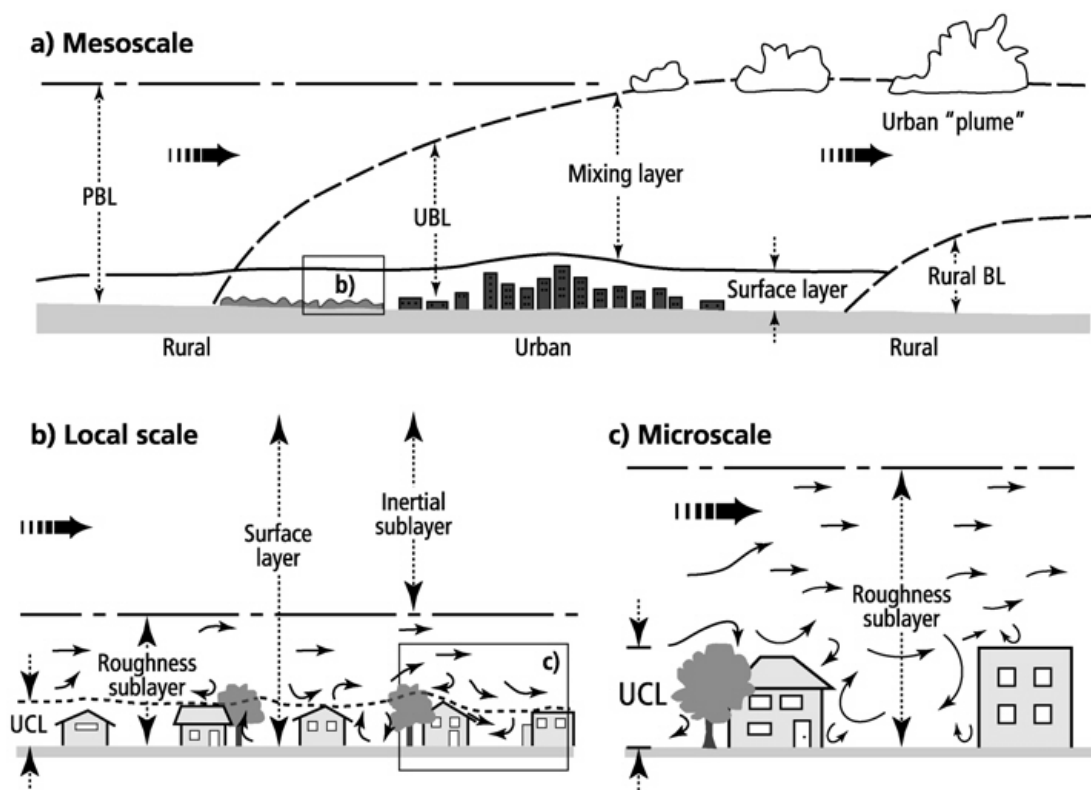


Figura 1: Esquema de escalas de clima e camadas verticais encontradas em áreas urbanas. PBL – Camada Limite Planetária, UBL – Camada Limite Urbana, UCL – Camada de Cobertura Urbana [modificado a partir de Oke, 1997].

Houve um grande desenvolvimento no estudo de ICU com diferentes métodos de medida. A abordagem de sensoriamento remoto tem sido proeminente e tem melhorado ao longo dos anos com a disponibilidade de novos dados, assim como melhoraram as técnicas tanto qualitativa como quantitativamente para investigar este fenômeno. Os dados do canal infravermelho detectados remotamente por satélite são uma fonte única de informação para

definir as ilhas de calor em superfície, que estão relacionadas com as ICU na CCU (Srivani e Hokao, 2012). Os dados em locais determinados (em particular, os dados permanentes das estações meteorológicas) oferecem alta resolução temporal e cobertura a longo prazo, mas carecem de detalhes espaciais.

Os diversos métodos que são empregados para estudar as ICU utilizam coleta de dados em estações de superfície (Souza e Alvalá, 2012), como também aplicam o sensoriamento remoto para estimar a temperatura da superfície ou extrair informações das características da superfície (Gamarra, Corrêa e Targino, 2014). Outras abordagens, como sensores móveis (Corrêa, 2013) e simulações numéricas (Souza, 2012), também têm sido utilizados em estudos desta temática.

2.2 Ilha de calor urbana atmosférica (estudos observacionais)

A clareza para estabelecer uma estação meteorológica urbana é essencial para representar o ambiente meteorológico em um lugar para fins climatológicos gerais e o desejo de fornecer dados em apoio das necessidades de um usuário particular (WMO, 2006). Em ambos os casos as escalas espacial e temporal de interesse devem ser definidas, assim como a localização da estação e a exposição dos instrumentos. As temperaturas do ar são geralmente medidas entre 1,5 m e 2,0 m acima do solo, onde observações meteorológicas normalmente são tomadas.

Utilizar medições de temperatura do ar para avaliar as ICU também é complicado por vários fatores: (1) são necessários dados de estações meteorológicas, tanto dentro da cidade e em áreas não urbanas próximas à cidade; (2) Mudanças na instrumentação, amostragem, métodos de armazenamento de dados e estação microclimática devem ser considerados; (3) as comparações entre áreas urbanas centrais e áreas na periferia da cidade, os registros de

temperatura se tornam menos válidos, pois áreas nas imediações dos aeroportos (muitas vezes utilizados para situar estações meteorológicas) tornam-se urbanizadas (Mirzaei e Haghghat, 2010).

A maioria dos estudos de ICU nas cidades utilizando dados observacionais são baseados em uma ou duas estações meteorológicas fixas, muitas vezes localizadas no centro da cidade e/ou aeroporto, o que não é representativo da cidade inteira. Atualmente, poucos dados observacionais a longo prazo sobre a variabilidade espacial do clima local dentro das cidades estão disponíveis (Arnfield, 2003).

As características espacial e temporal da temperatura do ar foram estudadas por Suomi e Käyhkö (2012) em torno da cidade de Turku, sudoeste da Finlândia durante o período de 2002 – 2007 utilizando uma rede de 36 sensores de temperatura Hobo H8 que monitoraram a temperatura em intervalos de 30 minutos. O objetivo era avaliar as diferenças espaciais diurnas e sazonais da temperatura e o comportamento dessas diferenças em relação ao uso da terra, topografia e na vizinhança de corpos d'água. A diferença da temperatura espacial entre a área urbana e rural foi de 1,9 °C. O estudo mostrou que as diferenças de temperatura espacial são mais pronunciadas durante a noite e no final do verão.

Kim e Baik (2004) investigaram a estrutura espacial e temporal das ICU na área metropolitana de Seul na Coreia do Sul usando dados de temperatura próximos à superfície em 31 estações meteorológicas automáticas para o período de um ano, de março de 2001 a fevereiro de 2002. Eles notaram que as ICU em Seul são mais fortes à noite do que durante o dia e diminui com o aumento da velocidade do vento e cobertura de nuvens. Também encontraram que a intensidade máxima média das ICU é de 2,2 °C durante o período de um ano. Um valor similar para intensidade das ICU foi encontrado por Souza e Alvalá (2012) para cidade de Manaus de 2000 a 2008, apenas diferindo no período de máxima intensidade, sendo mais forte no período diurno. Para a região metropolitana do Rio de Janeiro, Silva e

Longo (2012) encontraram o máximo de aproximadamente 2,0 °C, entre 17 e 19h para o período de 2005 a 2008.

Em regiões tropicais, a variação sazonal do efeito das ICU é mais intensa durante a estação seca, seguido pela estação chuvosa (Souza e Alvalá, 2012; Arifwidodo e Tanaka, 2015). Este resultado pode estar diretamente relacionado com as taxas de aquecimento e resfriamento observadas na floresta e áreas urbanas. Coraiola *et al.* (2012) mostraram que a intensidade das ICU foi mais intensa à noite na área central da cidade de Londrina e diminui nas áreas periféricas, principalmente sob a influência de um sistema de alta pressão estacionária durante o inverno.

Para quantificar as causas da variabilidade espacial das ICU na cidade de Portland nos Estados Unidos, Hart e Sailor (2008) aplicaram um método a um caso de teste específico, o qual utilizaram sensores de temperatura a bordo de um carro com objetivo de determinar diferenças espaciais da temperatura do ar a 2 m no verão em toda área metropolitana no período da tarde. Durante a travessia, a temperatura do ar variou 5,5 °C em toda área medida. Utilizando a mesma metodologia, Corrêa (2013) avaliou a temperatura e a umidade relativa do ar em algumas das principais ruas/avenidas da cidade de Manaus em dezembro de 2012, observando um aumento na temperatura do ar em bairros densamente povoados, diminuindo em regiões próximas ao rio, bem como em áreas verdes dentro da cidade.

A percepção da temperatura no corpo humano, muda com a variação das condições atmosféricas. A razão para estas mudanças está relacionada com a forma de como ocorre à troca de energia térmica com nosso meio ambiente. Existe, portanto, uma troca de calor entre o corpo (especialmente na superfície da pele) e o meio ambiente.

Van Hove *et al.* (2015) estudaram o clima local e o conforto térmico humano utilizando observações meteorológicas dentro da aglomeração de Rotterdam na Holanda entre 2010 a 2012. Eles perceberam que na maior parte do ano, a intensidade das ICU em áreas

densamente construídas pode ser considerável sob condições de céu claro e sem nuvens. Os valores mais elevados de ICU foram encontrados no verão, variando entre 4,3 °C para mais de 8,0 °C, dependendo da localização.

2.3 Ilha de calor urbana em superfície (sensoriamento remoto)

A temperatura da superfície é uma variável essencial para estudar a climatologia urbana (Voogt e Oke, 2003), sendo capaz de modular a temperatura do ar das camadas mais baixas da atmosfera urbana, além de ser importante para o balanço de energia na superfície. Medições de superfície tomadas por sensoriamento remoto têm algumas limitações: em primeiro lugar, não capturam completamente as emissões radiantes de superfícies verticais, tais como a parede de um edifício, porque o equipamento observa na maior parte as emissões de superfícies horizontais, tais como ruas, telhados e copas das árvores (Goldreich, 2006).

A detecção remota por satélite tem sido usada recentemente por uma questão de mapeamento espacial sobre áreas maiores e não apenas para medição da magnitude da ICU. O canal infravermelho termal (TIR) dos sensores remotos observam a superfície da ICU através da radiação de onda longa (ROL) emitida para cima a partir da superfície urbana, como também da ROL refletida da atmosfera. A maioria das pesquisas sobre ICU aplica uma resolução espacial com a banda infravermelho termal.

Imagens de satélite são orientadas por características do sensor e pela resolução da imagem. A resolução da imagem é geralmente considerada através de três aspectos que incluem resoluções espectrais, espaciais e radiométricas. A resolução temporal que é uma indicação da frequência de passagem de um sensor ao longo de um determinado lugar é também um guia importante para imagens de satélite. Atualmente, os sensores térmicos dos satélites disponíveis fornecem diferentes resoluções espaciais, temporais e radiométricas.

Ngie *et al.* (2014) revisaram os conceitos de ICU, fornecendo detalhes de dados de satélite por sensoriamento remoto e técnicas de processamento aplicadas por vários estudos para estimar a temperatura da superfície, a fim de estabelecer a existência do fenômeno da ICU. Uma variedade de sensores nas plataformas de satélite tem sido usada para fazer observações remotas da ICU, ou das temperaturas das superfícies urbanas. Embora existam centenas de instrumentos de sensoriamento remoto orbitando a Terra, uma plataforma específica que tem sido usada com sucesso para caracterizar e monitorar a ICU em superfície é a série de sensores do Landsat (Richardson, 2015).

A série de sensores Landsat exibe uma gama de resoluções dependendo do instrumento. O Thematic Mapper, a bordo do satélite Landsat 5, é um dos sensores mais usados nesta categoria para estudos de ICU. Isto porque seus dados multiespectrais de alta qualidade abrange uma cobertura mundial para dados históricos e multitemporais que são facilmente acessíveis. O mesmo tem uma banda termal, adequada para estimar a temperatura da superfície. Dada a resolução espacial relativamente pequena da banda termal do Landsat 5 (120 metros) e do Landsat 8 (100 metros), bem como a resolução temporal de 16 dias, os dados Landsat são um recurso valioso para uso em análises de ICU em superfície (USGS, 2016).

Utilizando dados Aqua a bordo do satélite MODIS e imagens Landsat TM/ETM +, Zhou *et al.* (2016) analisaram as tendências espaço-temporal do efeito da ICU em 32 grandes cidades chinesas de 2003 a 2012. Os resultados indicaram que a variação da temperatura diurna e noturna aumentou significativamente na maioria das cidades, sendo os regimes de clima-vegetação os principais responsáveis por essas tendências.

Para a visualização e realização de operações matemáticas intra e interbandas, recortes, classificação, realce e outras tarefas nas imagens de satélite, podem ser utilizados diversos softwares, dentre eles destaca-se o ERDAS Imagine. O módulo Model Maker do

software ERDAS Imagine fornece uma ferramenta útil para realizar a maioria das funções de processamento de imagem em estudos que envolvem ICU (Liu e Zhang, 2011; Kumar *et al.*, 2012; Almutairi, 2015). Sun *et al.* (2010) projetaram um modelo espaço-temporal com a ferramenta Model Maker para estimar a temperatura da superfície e para descrever a evolução/mudanças na ICU na região do delta do rio Pearl no sul da China.

A contribuição da presente pesquisa é essencial para distinguir as ICU que são observadas através da temperatura do ar (atmosférica) e pela temperatura da superfície, e se existe alguma similaridade nos padrões espacial e temporal entre os trabalhos citados. Também pode fornecer métodos e informações básicas para a redução do efeito da ICU e estabelecer um planejamento urbano ambiental.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Área de estudo

Manaus, capital do estado do Amazonas (Figura 2a, b, c), está localizada na margem esquerda do rio Negro, entre 2° 57' e 3° 10' de latitude Sul e 59° 53' e 60° 07' de longitude Oeste. Limita-se ao norte com o município de Presidente Figueiredo; ao sul, com os municípios de Careiro e Iranduba; a leste, com os municípios de Rio Preto da Eva; e ao oeste com o município de Novo Airão. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), Manaus possui uma população estimada superior a dois milhões de habitantes em 2016, tornando-se a 7ª cidade mais populosa do Brasil. A região é fortemente influenciada pela sazonalidade da precipitação, sendo o regime pluviométrico, o principal elemento para conceituar as estações na região. A estação chuvosa é a mais longa, de novembro a maio, com acumulados médios mensais de até 335,4 mm em março, enquanto o período menos chuvoso ocorre entre julho a setembro, quando a precipitação se reduz, em média, a 47,3 mm mensais (agosto) (INMET, 2009). A região amazônica apresenta amplitude térmica sazonal de 1,0 - 2,0 °C e médias de temperatura do ar entre 24,0 e 26,0 °C. Manaus possui extremos nos meses de setembro (27,9 °C) e abril (25,8 °C) (Cavalcanti *et al.*, 2009).

O regime de precipitação no estado do Amazonas é caracterizado pela atuação de sistemas meteorológicos com diferentes escalas de tempo e espaço. A ocorrência de sistemas de grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) causam chuvas intensas na região amazônica, principalmente, no verão e outono austral. Estes dois sistemas são diretamente influenciados por um anticiclone bem desenvolvido em altos níveis (200 hPa) situado bem próximo do platô boliviano, conhecido como Alta da Bolívia (AB) (Virji, 1981). Este sistema está associado com a

liberação de calor latente, contribuindo para a ocorrência de chuvas na região norte do Brasil durante o verão, devido sua influência na manutenção e intensificação da convecção na Amazônia (Mota e Nobre, 2006).

Em uma escala menor, outros sistemas que contribuem com a precipitação na região norte são os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) e as linhas de instabilidade (LIs). Além da contribuição dos sistemas de grande e meso escala, que dão origem à precipitação em Manaus, localmente destacam-se os efeitos da brisa fluvial e da convecção diurna que ocasionam chuvas isoladas, as quais são caracterizadas por precipitação intensa durante curto período de tempo e com um grande número de descargas atmosféricas (Barbosa *et al.*, 2010).

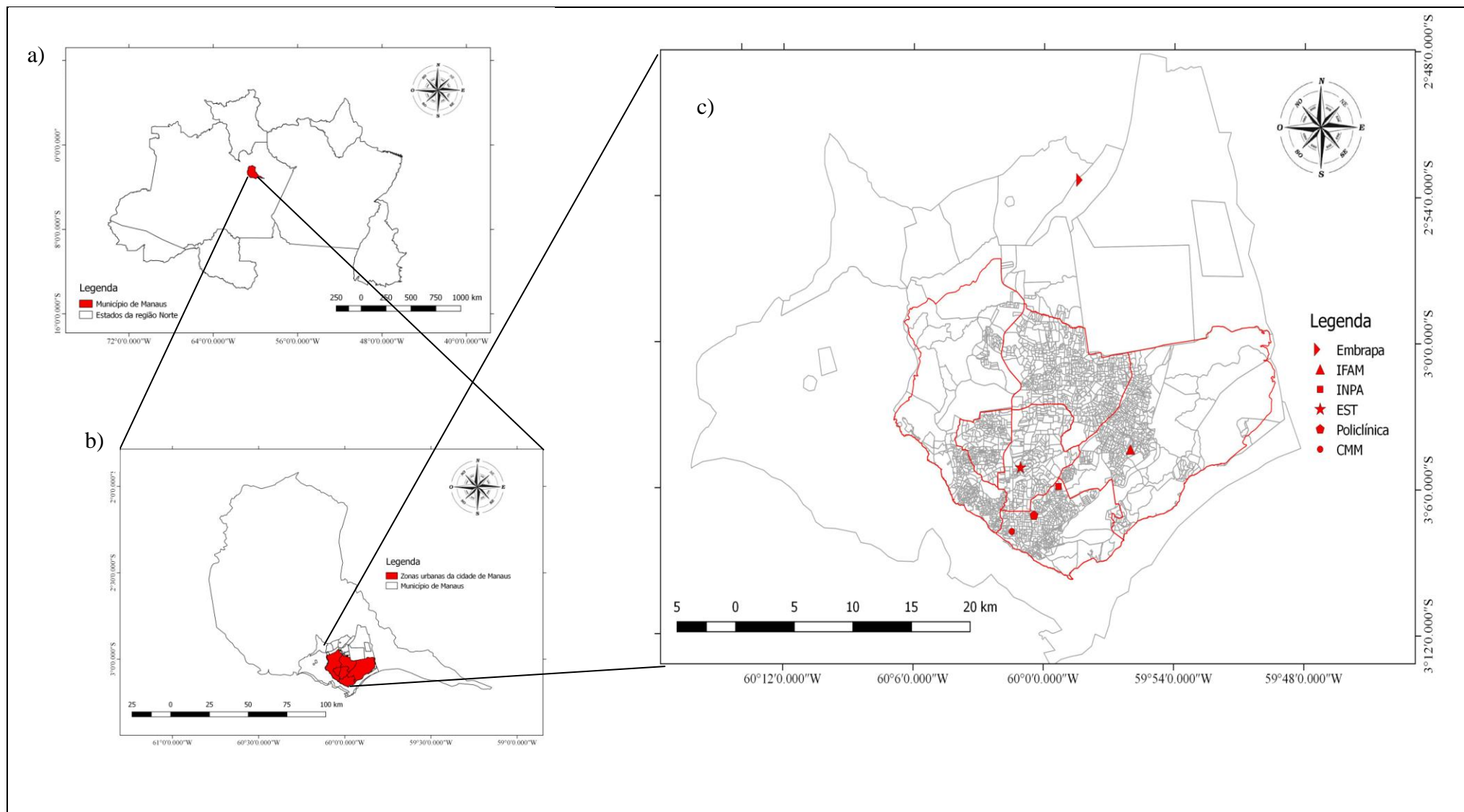


Figura 2. a) Mapa da região norte do Brasil com a localização em destaque do município de Manaus. b) Mapa do município de Manaus com a localização em destaque para zonas urbanas da cidade. c) Distribuição espacial das estações automáticas Onset/REMCLAM em Manaus e áreas adjacentes.

3.1.2.1 Dados de superfície

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram obtidos de seis estações automáticas do projeto Rede de Mudanças Climáticas da Amazônia – REMCLAM (Figura 2c) destinadas a fazer o monitoramento meteorológico de Manaus e seu entorno. As estações são do fabricante Onset equipadas com diversos sensores programados para fazer medidas a cada 5 minutos das variáveis: velocidade e direção do vento, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar e pressão atmosférica. Os sensores Temperature/RH Smart Sensor S-THB-M00x e Rain Gauge Smarte Sensor (Figura 3) foram utilizados para fazer as medidas de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação. A coleta e transmissão dos dados foram realizadas através do datalogger U30/GSM.

a)



b)



Figura 3. (a) Temperature/RH Smart Sensor (S-TH-M00x) e (b) Rain Gauge Smart Sensor.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 são listadas as especificações técnicas do sensor Rain Gauge Smart Sensor, Temperature/RH Smart Sensor e as estações, com suas respectivas coordenadas geográficas (latitude e longitude), zonas da cidade onde se encontram instaladas e período de início e término dos dados, respectivamente.

Tabela 1. Especificações técnicas do sensor Rain Gauge Smart Sensor

Especificações	Precipitação
Faixa de medição	0 a 12,7 cm
Calibração acurácia	+/- 1% até 20 mm/hora
Resolução	0,2 mm (S-RGB-M002)
Bits por amostra	12

Das seis estações estudadas, cinco encontram-se dentro do perímetro urbano e uma na área rural. As estações CMM, EST e Embrapa estão instaladas à superfície em um tripé de 2 m, a estação Policlínica no alto de um prédio (50 metros), IFAM sobre o telhado (5 metros) e a estação do INPA em uma torre micrometeorológica de 30 metros. O período de dados compreende treze meses, começando no mês de julho de 2013 e terminando em julho de 2014. Porém, não são todas estações que o período de dados começa em julho de 2013 e termina em julho de 2014 (Tabela 3). Em 2013, a estação da Policlínica teve falha no funcionamento às 11:00h no dia 3 de outubro e falta nos dados de precipitação entre às 11:15 e 23h:55min do dia 30 de setembro, já para a estação da EST, foi observado falta nos dados de temperatura do ar entre às 10:45 e 11h:20min do dia 22 de novembro e no IFAM às 23:05 até 23h:55min no dia 31 de dezembro. Da mesma forma para 2014, a estação da Embrapa obteve falta de dados de temperatura do ar às 9:35 até 9h:45m no dia 26 de março e entre às 10:00 a 10h:10m do dia 9 de maio, não foi realizada observação com os dados de precipitação no mês de janeiro e fevereiro na estação Policlínica pelo fato de apresentarem valores abaixo do esperado para os respectivos meses, totalizando 14,2 mm em janeiro e 9,2 mm em fevereiro.

Devido à falta e falhas nos dados de temperatura do ar e precipitação não foi possível observar a ICU em todos os meses de 2013 e 2014 para as seis estações distribuídas pela

cidade. Nesse caso, em alguns meses, as observações e os cálculos foram feitos apenas para algumas estações. Fazendo uma análise apenas para os meses em que não foram verificadas falhas/falta nos registros dos dados de temperatura do ar nas estações utilizadas neste estudo, apenas os meses de janeiro e fevereiro de 2014 foram destacados.

Tabela 2. Especificações técnicas do sensor Temperature/RH Smart Sensor

Especificações	Temperatura	Umidade Relativa
Faixa de medição	-40° a 75 °C (-40° a 167 °F)	0-100% de UR em -40° a 75 °C (-40° a 167°F); A exposição a condições abaixo de -20 °C (-4 °F) ou acima de 95% de UR pode aumentar temporariamente o erro máximo do sensor de UR em mais de 1%
Acurácia	+/- 0,21°C a partir de 0° a 50 °C (0,38 °F a partir de 32° a 122 °F)	+/- 2,5% de 10% a 90% de UR (típica), até um máximo de +/- 3,5%
Resolução	0,02 °C a 25 °C (0,04 °F a 77° F)	0,1% de UR a 25 °C (77 °F)
Bits por amostra	12	10
Tempo de resposta	5 min no ar movendo 1 m/sec	5 min no ar movendo 1 m/sec com capa de proteção

Tabela 3. Localização e período de dados das estações automáticas Onset/REMCLAM

Estação	Latitude	Longitude	Zona	Início	Término
CMM	3° 07' 51" S	60° 01' 36" O	Sul	(Agosto/2013 — Junho/2014)	
EMBRAPA	2° 53' 25" S	59° 58' 06" O	Rural	(Julho/2013 — Julho/2014)	
EST	3° 05' 32" S	60° 00' 59" O	Centro-Sul	(Outubro/2013 — Junho/2014)	
IFAM	3° 04' 46" S	59° 55' 58" O	Leste	(Julho/2013 — Março/2014)	
INPA	3° 05' 49" S	59° 59' 10" O	Centro-Sul	(Novembro/2013 — Julho/2014)	
POLICLÍNICA	3° 07' 11" S	60° 00' 25" O	Sul	(Julho/2013 — Abril/2014)	

3.1.2.2 Dados orbitais

Foram utilizadas imagens de satélite Landsat 8 OLI/TIRS nas datas de 19 de julho de 2013, 6 de julho de 2014, 10 de agosto de 2015 e 11 de setembro de 2015, adquiridas no site do Serviço Geológico do Estados Unidos (USGS), através do seguinte endereço <<http://glovis.usgs.gov/>>. A Tabela 4 mostra algumas informações contidas nos metadados das imagens.

As imagens Landsat 8 OLI consistem em nove bandas espectrais com uma resolução espacial de 30 metros para bandas de 1 a 9. A resolução da banda 8 (pancromático) é de 15 metros e TIRS para as bandas térmicas 10 e 11 bastante útil na obtenção da temperatura de superfície com resolução de 100 metros. A resolução radiométrica é 16 bits por pixel. Todas as imagens foram selecionadas para o período menos chuvoso da região, pelo fato desta época haver uma quantidade mínima de nuvens, contribuindo com uma melhor visualização das imagens e na obtenção dos parâmetros de superfície. Todo o processamento das imagens foi feito utilizando a licença do software ERDAS IMAGINE 2013.

Tabela 4. Resumo das informações contidas nos metadados das imagens

Data de passagem	Órbita/Ponto	Tempo central da imagem (UTC)	Ângulo de elevação do Sol (°)	Cobertura de nuvens (%)
19/7/2013	231/62	14:14:53	53,5	0,94
6/7/2014	231/62	14:12:45	52,2	3,62
10/8/2015	231/62	14:12:36	56,1	0,2
11/9/2015	231/62	14:12:50	62,5	0

3.2 Metodologia

3.2.1 Intensidade da ilha de calor urbana (IICU)

A intensidade da ICU muitas vezes é definida pela disponibilidade de observações. Por exemplo, quando um número limitado de locais de observação estão presentes, a Intensidade da ilha de calor urbana (IICU) (Souza e Alvalá, 2012) é frequentemente calculada como a diferença entre os máximos das temperaturas urbanas e rurais usando locais de observações individuais:

$$IICU = \frac{1}{D} \left[\sum_{d=1}^{d=D} (T_{u,d} - T_{r,d}) \right] \quad (1)$$

Em que d é o número do dia, D o número de dias, T_u temperatura na área urbana e T_r a temperatura na área rural.

No entanto, quando vários locais de observação estão disponíveis, a IICU pode ser calculada através da diferença entre as médias das temperaturas urbanas e rurais (Kim e Baik, 2004).

3.2.2 Índice de Desconforto térmico

Entre as diversas equações para obter o nível de conforto térmico a adaptação do cálculo do Índice Desconforto de Thom (DI_T) é obtida através da expressão 2 (Monteiro e Alucci, 2005; Azevedo *et al.*, 2015):

$$DI_T = T_a - (0,55 - 0,0055RH_a)(T_a - 14,5) \quad (2)$$

Em que, T_a é a temperatura média do ar (°C) e RH_a é a umidade relativa média do ar (%)

O DI_T é frequentemente utilizado em diversas pesquisas brasileiras, porém foi desenvolvido para latitudes médias não sendo adequado para regiões tropicais. Uma versão alternativa da equação de Thom, segundo Maia e Gonçalves (2002) é o Índice de Temperatura Efetiva (TE) ou Índice de Temperatura e Umidade proposto por Nieuwolt (1977), geralmente utilizado para avaliar o conforto térmico em ambientes abertos em condições de calor, podendo facilmente ser aplicado neste trabalho. A Equação 3 representa o Índice de Temperatura Efetiva:

$$TE = T - 0,55 * (1 - 0,01UR) * (T - 14,5) \quad (3)$$

Em que TE é a temperatura efetiva (°C), T é a temperatura média do ar (°C) e UR é a umidade relativa média do ar (%).

A estrutura das Equações 2 e 3 é semelhante com a possibilidade de encontrar resultados próximos. A informação na Tabela 5 foi utilizada para classificar o nível de conforto térmico (Farias e Brandão, 2006) para os diferentes locais onde se encontram as estações meteorológicas.

Tabela 5. Classificação do Índice de Desconforto

Intervalo do ID (°C)	Níveis de Conforto térmico
> 30	Estresse térmico
27 °C-30	Desconforto por aquecimento
24 °C-27	Leve desconforto
20 °C-24	Zona de conforto ou Neutralidade térmica

3.2.3 Processamento digital das imagens

Inicialmente, para o processamento das imagens foi executado o empilhamento das bandas e o recorte das imagens. Em seguida, foi utilizada a ferramenta *Model Maker* para obter a temperatura da superfície e outros parâmetros diretamente do arquivo Landsat com formato .img. Para uma melhor compreensão das diversas etapas do processamento das imagens foi elaborado o fluxograma representado na Figura 4, com todas as etapas de obtenção da temperatura da superfície.

Após a realização da primeira e segunda etapa, foi calculada a radiância espectral (L_b). Para a determinação de L_b de cada pixel e banda foram utilizados os termos aditivo $A_{rad,b}$ e multiplicativo $M_{rad,b}$ relativos a radiância, extraídos dos metadados de cada imagem (grupo = radiometric_rescaling), calculada de acordo com a seguinte expressão (Silva *et al.*, 2016):

$$L_b = M_{rad,b} * ND_b + A_{rad,b} \quad (4)$$

Em que, L_b é a radiância espectral para os comprimentos de onda da banda ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$), ND_b , é o produto padrão de valores de pixel da banda específica (DN em bits) e b subíndice representando cada uma das três bandas do OLI/TIRS.

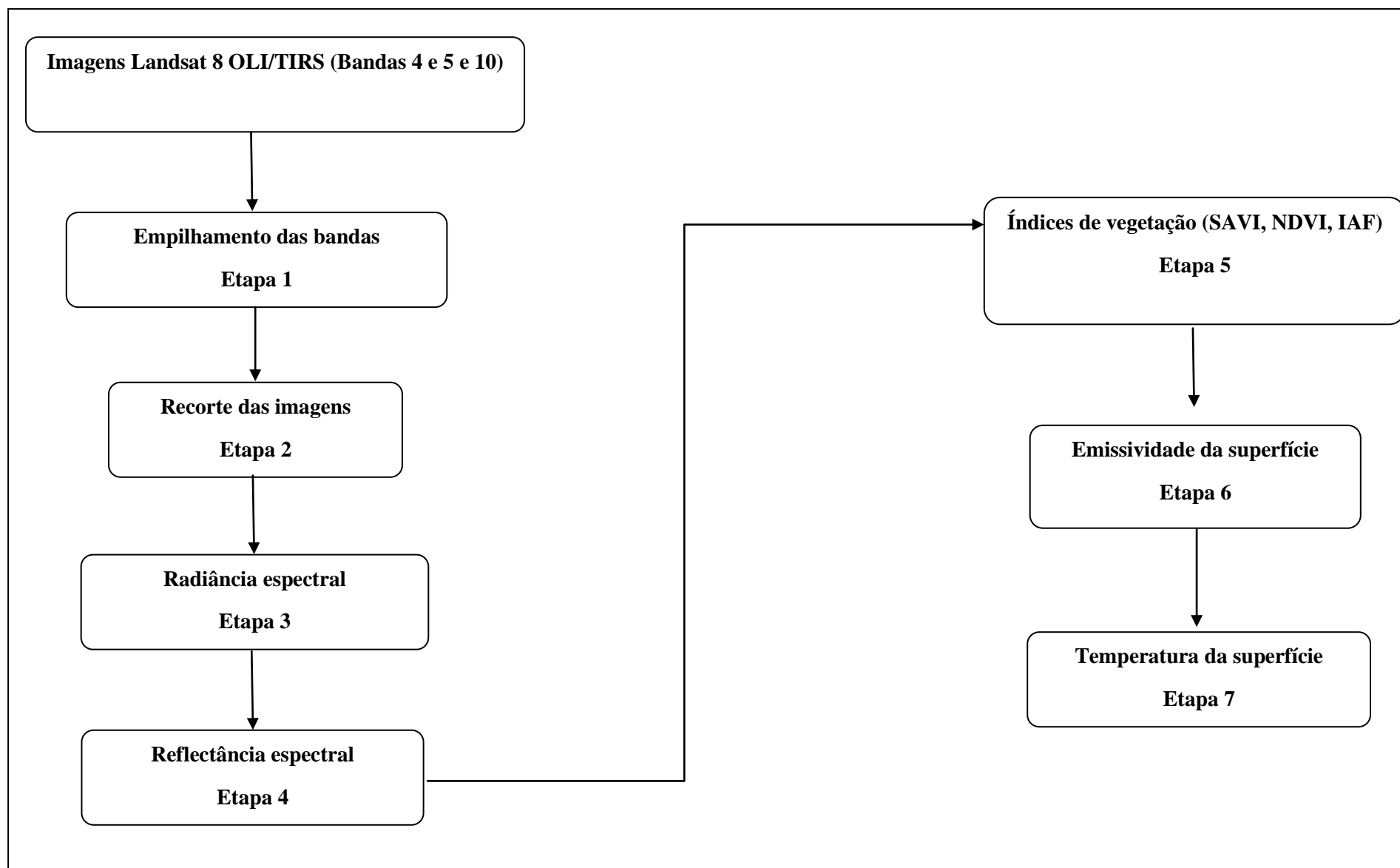


Figura 4. Diagrama ilustrativo das etapas destinadas à obtenção da temperatura da superfície.

Da mesma forma, para a obtenção da reflectância de cada uma das bandas (4 e 5) foi utilizada a seguinte equação obtida por Silva *et al.* (2016):

$$r_b = \frac{(M_{ref,b} * ND_b + A_{ref,b})}{cosZ * dr} \quad (5)$$

Na qual:

$A_{ref,b}$ e $M_{ref,b}$ = representam os termos aditivo e multiplicativo relativos a reflectância de cada banda, extraídos dos metadados da imagem (grupo = radiometric_rescaling);

ND_b = produto padrão de valores de pixel da banda específica (DN em bits);

Z = ângulo zenital solar, podendo ser obtido a partir da elevação do Sol, onde $\cos Z = \sin E$;

b = subíndice representando cada uma das seis bandas do OLI;

dr = corresponde à correção da excentricidade da órbita terrestre, dada por:

$$dr = \left(\frac{1}{d_{ES}} \right)^2 \quad (6)$$

Em que:

d_{ES} = Distância Terra-Sol (unidade astronômica) no dia de cada imagem, também extraída dos metadados;

Neste estudo foram utilizadas as reflectâncias das bandas vermelho (ρ_v) e infravermelho próximo (ρ_{iv}) a fim de usá-las como entrada para os Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI), Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (Soil Adjusted Vegetation Index - SAVI) e para o cálculo do Índice de Área Foliar (IAF). No OLI do landsat 8 as bandas 4 e 5 são do vermelho (0,64 – 0,67 μm) e do infravermelho próximo (0,85 – 0,88 μm), respectivamente. O NDVI é

obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo (ρ_{iv}) e do vermelho (ρ_v), pela soma das mesmas:

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (7)$$

Com a informação do NDVI é possível identificar a quantidade e a presença de vegetação verde, seus valores variam de -1 a +1. Para o cálculo do SAVI foi utilizada a equação proposta por Huete (1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L + \rho_{iv} + \rho_v)} \quad (8)$$

Em que L é uma função do tipo do solo. Neste estudo foi utilizado $L = 0,1$. Após a determinação do SAVI é possível obter o IAF, sendo definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, sendo um indicativo da biomassa de cada pixel da imagem, obtida por Allen *et al.* (2007) através da expressão:

$$IAF = - \frac{\ln((0,69 - SAVI) / 0,59)}{0,91} \quad (9)$$

Emissividade da superfície terrestre (ε) é um dos parâmetros mais importantes para estimar a temperatura da superfície a partir de dados de sensoriamento remoto. Segundo Allen *et al.* (2007), a ε pode ser obtida, para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$, segundo:

$$\varepsilon = 0,97 + 0,0033 * IAF \quad (10)$$

A obtenção da temperatura da superfície (T_s) é determinada a partir da radiância espectral da banda térmica do Landsat 8 e a emissividade (ε) obtida na etapa anterior, onde a conversão em Kelvin é dada por:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left[\left(\frac{\varepsilon * K_1}{L_{\lambda,10}} \right) + 1 \right]} \quad (11)$$

K_1 (774,89 K) e K_2 (1321,08 K) para a banda 10 são os coeficientes de conversão para o satélite L8 e L_λ é a radiância espectral para os comprimentos de onda da banda 10.

Embora o Landsat 8 tenha duas bandas termais, ou seja, banda 10 e banda 11, a equipe da Landsat afirma que devido à incerteza de calibração maior associada com a banda 11, é recomendável que os usuários não recorram aos dados da banda 11 na análise quantitativa dos dados TIRS (USGS, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade diária e horária da ICU

Para estudos de ICU atmosférica, as diferenças da temperatura do ar entre a área urbana e rural medidas na camada mais próxima da superfície mostram variabilidade espacial e temporal significativa dentro de uma cidade (Fernando, 2013). Durante o dia, a diferença urbano-rural é relativamente pequena, negativa ou inexistente em centro urbanos, por isso o período noturno é preferencialmente mais adotado para observação de ICU atmosférica.

Inicialmente, para a identificação das diferenças de temperatura do ar entre a área urbana e rural (ICU), serão comparados os dados das estações urbanas (CMM, EST, IFAM, INPA e Policlínica) com os da rural (Embrapa). Em janeiro de 2014, a variabilidade diária da ICU foi mais recorrente entre 2,0 a 4,0 °C durante todo o mês, porém em alguns dias (4, 8, 15, 17 e 31) tenha chegado a um valor próximo a 9,0 °C na estação CMM (Figura 5). Esse valor bastante exagerado de ICU pode ser justificado pelo fato que nos dias 4 e 31 não terem sido verificado ocorrência de chuva e nos dias 8 e 15 terem sido verificado um valor relativamente pequeno de precipitação na estação CMM (Figura 6). Porém, podem-se observar valores altos de ICU em dias que chove em todas as estações, como foi o caso do dia 17.

Fazendo uma avaliação horária em janeiro verifica-se que a ICU apresenta valores negativos no período diurno (7 às 17 horas) em todas as estações, principalmente à tarde, enquanto no período noturno (18 às 24 horas) e na madrugada (1 às 6 horas) estes valores negativos são inexistentes, assim como são verificados valores de ICU entre 2,0 a 6,0 °C (Figuras 7 a, b, c, d, e). Entre os dias 1 e 4 foram observadas as maiores variações de ICU (3,0 a 6,0 °C), sendo mais intensa em dias que não ocorre precipitação. No final do dia 1, por volta das 21 a 23 horas foi verificado um valor acima de 6,0 °C nas estações CMM e Policlínica (Figuras 7 a, e).

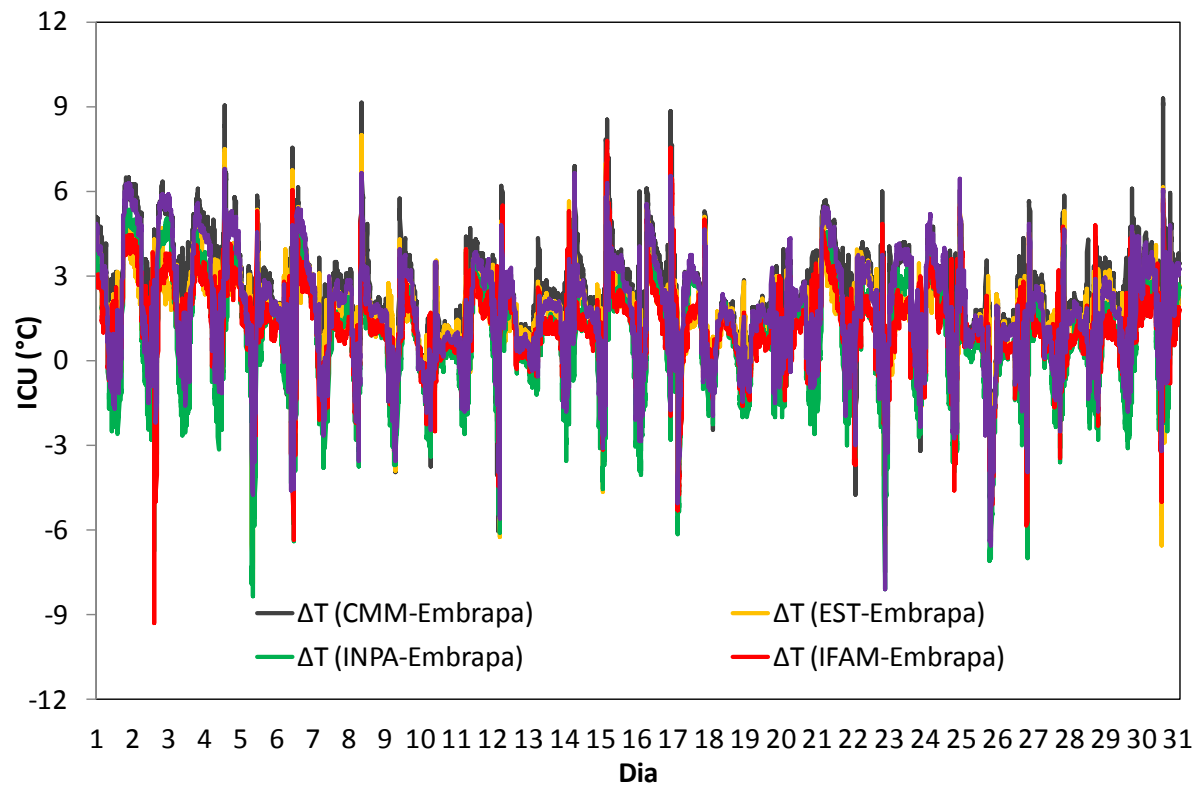


Figura 5. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de janeiro de 2014.

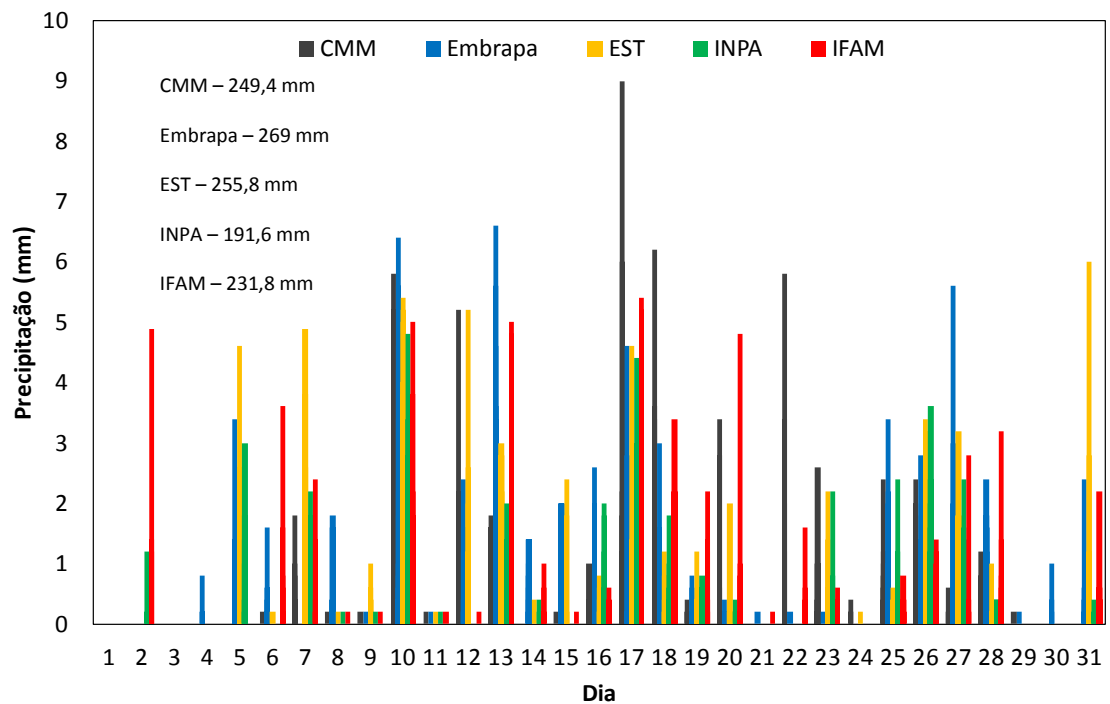


Figura 6. Variabilidade diária da precipitação a cada 5 minutos para o mês de janeiro de 2014.

A variabilidade diária da ICU no mês de fevereiro apresentou a mesma similaridade do mês de janeiro com valores entre 2,0 a 4,0 °C, em alguns dias foram observado valores acima de 5,0 °C nas estações CMM, EST, IFAM e Policlínica (Figura 8). Nos dia 7 e 13, a estação Embrapa registrou precipitação superior às demais estações urbanas (Figura 9), contribuindo com valores de ICU acima de 6,0 °C em todas as estações. Observando um dia sem ocorrência de chuva, por exemplo, no dia 27, percebe-se que a ICU não ultrapassou 4,0 °C.

Houve uma grande redução na intensidade da ICU no mês de fevereiro no período noturno e na madrugada comparado com o mês de janeiro, apresentando valores entre 1,0 a 3,0 °C, nas estações CMM, EST e IFAM, porém a estação Policlínica apresentou valores acima de 4,0 °C em alguns dias nestes períodos (Figura 10). A Figura 10 d mostra que a estação INPA apresentou os menores valores de ICU durante todo o mês, não ultrapassando os 3,0 °C. Em alguns horários a ICU é inexistente ou relativamente pequena no período diurno, embora, em alguns dias as maiores diferenças urbano-rural foram observadas no período da tarde.

Fernando (2013) comenta que as condições ideais para a observação da ICU atmosférica são céu claro e calmo, pois o vento e as nuvens servem como amortecedores para o seu desenvolvimento. Um desses fatores torna-se obstáculo na região amazônica, principalmente quando diz respeito à nebulosidade. Outro estudo (EPA, 2008) diz que a ICU é mais intensa à noite ou pouco antes de amanhecer e no inverno.

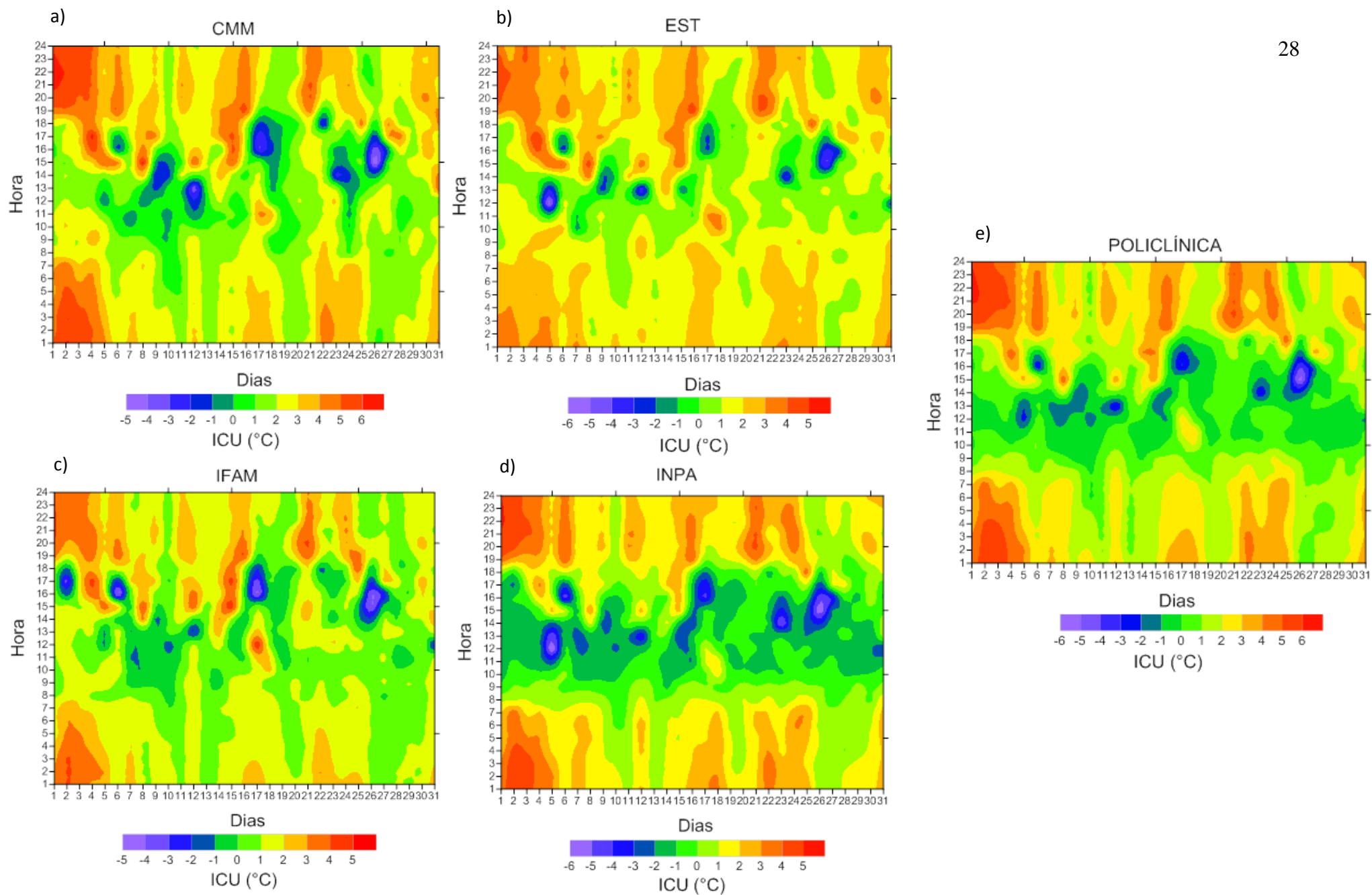


Figura 7. Comparação da média horária da ICU para o mês de janeiro de 2014 entre as estações urbanas CMM (a), EST (b), IFAM (c), INPA (d) e Policlínica (e) e a estação Embrapa (rural).

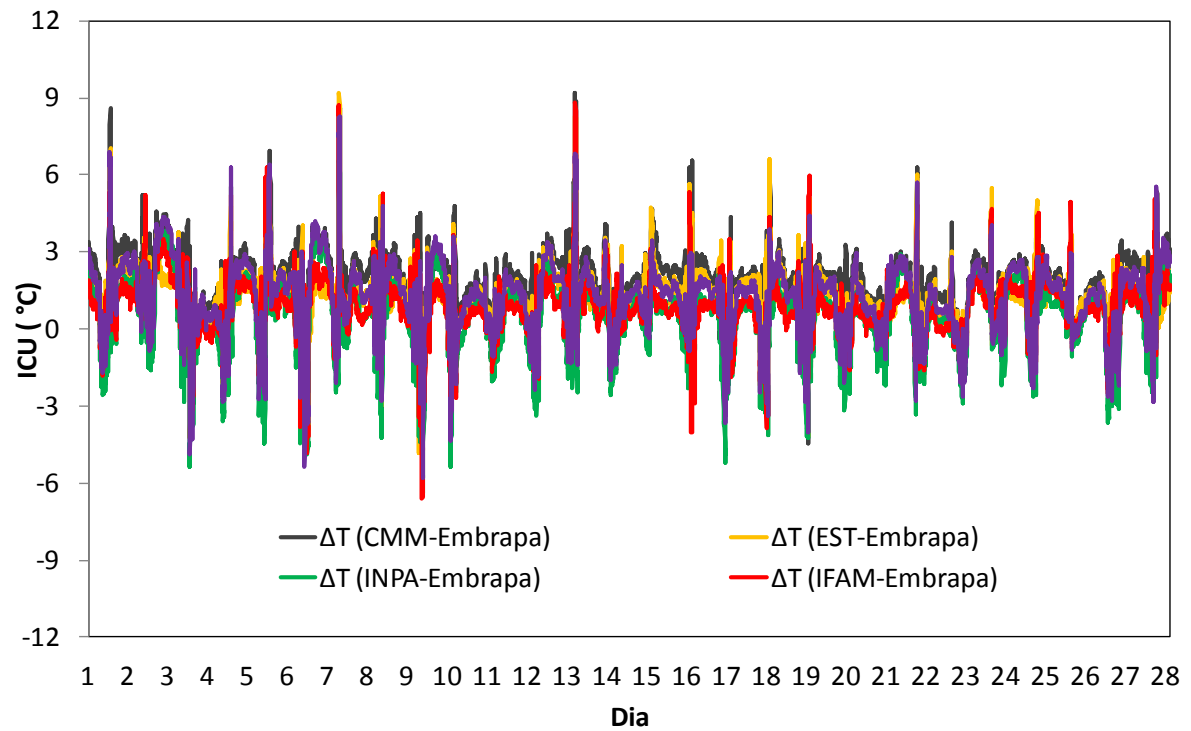


Figura 8. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de fevereiro de 2014.

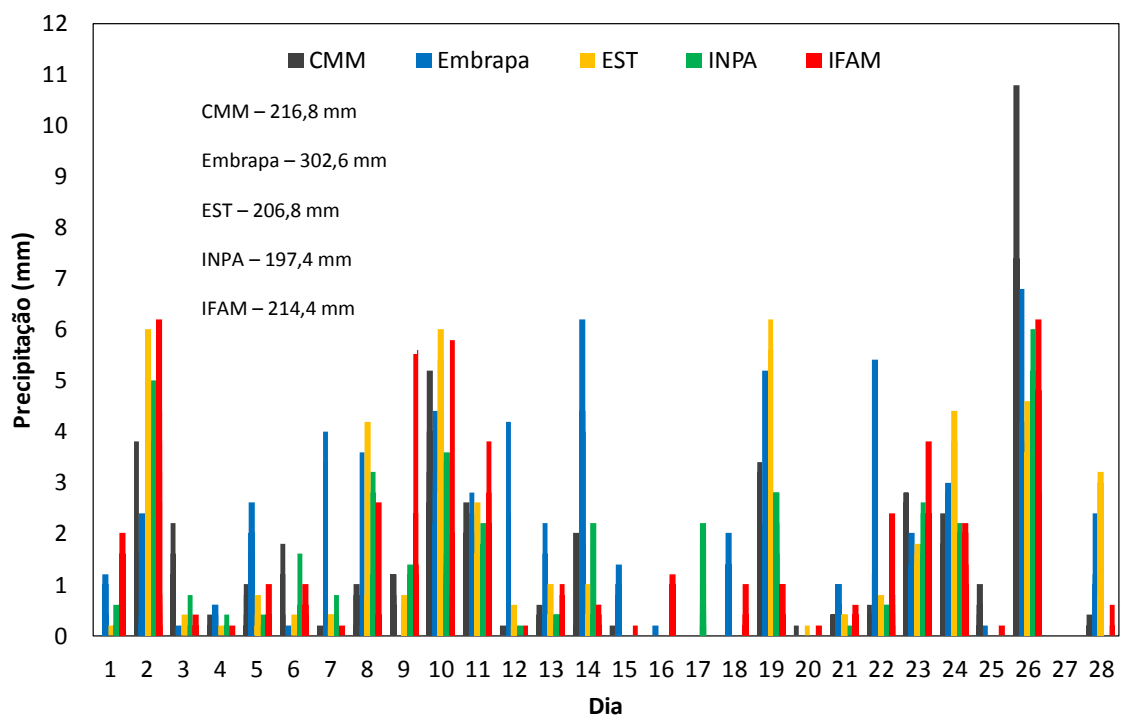


Figura 9. Variabilidade diária da precipitação a cada 5 minutos para o mês de fevereiro de 2014.

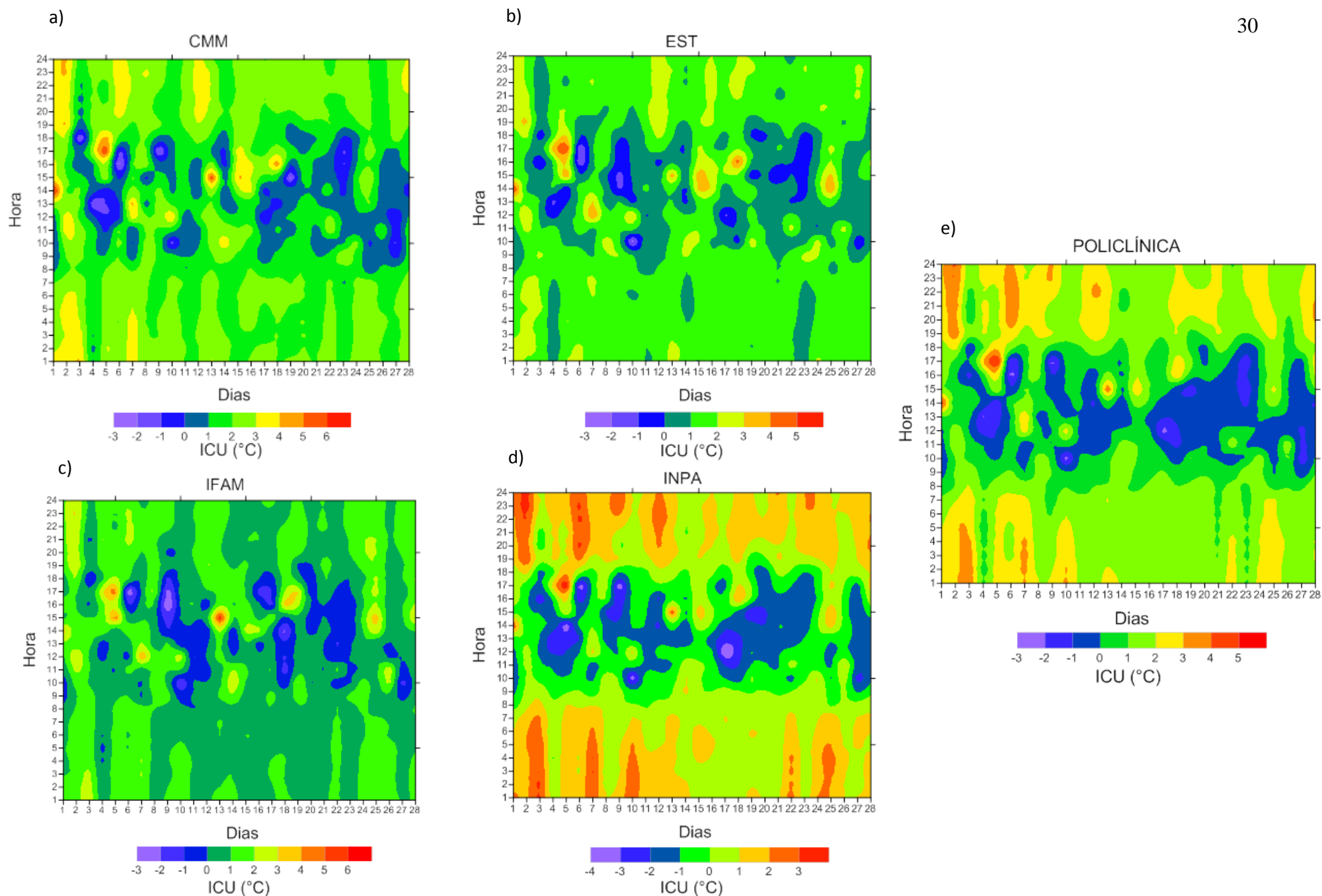


Figura 10. Comparação da média horária da ICU para o mês de fevereiro de 2014 entre as estações urbanas CMM (a), EST (b), IFAM (c), INPA (d) e Policlínica (e) e a estação Embrapa (rural).

De acordo com os dados climatológicos do INMET (2009), em Manaus, os ventos têm intensidade média anual de 2,5 m/s, apresentando uma baixa amplitude, com intensa precipitação nos meses de verão e pouca chuva nos meses de inverno o que possibilita estudar a ICU na estação menos chuvosa da região.

Neste sentido, foram feitas análises para os meses que apresentam a menor climatologia mensal da precipitação e a maior climatologia mensal da temperatura do ar. Para os meses de agosto e setembro de 2013, as observações foram realizadas apenas em quatro estações (CMM, Embrapa, IFAM e Policlínica) devido à ausência e falha de dados nas demais estações.

Os primeiros dias de agosto de 2013 não houve registro de chuva nas estações (Figura 12), isso fez com que a ICU atingisse um valor superior a 6,0 °C, sendo que nos dias 9, 19, 20 e 23 este valor ficou acima de 9,0 °C (Figura 11). Os resultados da Figura 13 mostraram que a média horária da ICU é geralmente mais intensa antes do nascer do sol, após o pôr-do-sol e no período noturno, com uma diferença urbano-rural acima de 4,0 °C em estações (CMM e Policlínica) localizadas na zona sul da cidade. Durante o período noturno do dia 1 de agosto foram observados valores acima de 6,0 °C nas estações CMM e Policlínica (Figuras 13 a, c), assim como foi verificado no mês de janeiro. Após as primeiras horas de raios solares, a diferença de temperatura do ar entre as estações urbanas e a rural tende a diminuir e muitas vezes tornando-se negativa. Porém, depois do meio dia, também se pode observar altos valores de ICU, com valor acima de 4,0 °C, como pode ser visto entre 15 e 17 horas no dia 4 e 7 de agosto nas estações IFAM e Policlínica (Figuras 13 b, c). Além disso, não foi observado nenhum valor negativo de ICU nas três estações durante o período noturno e madrugada.

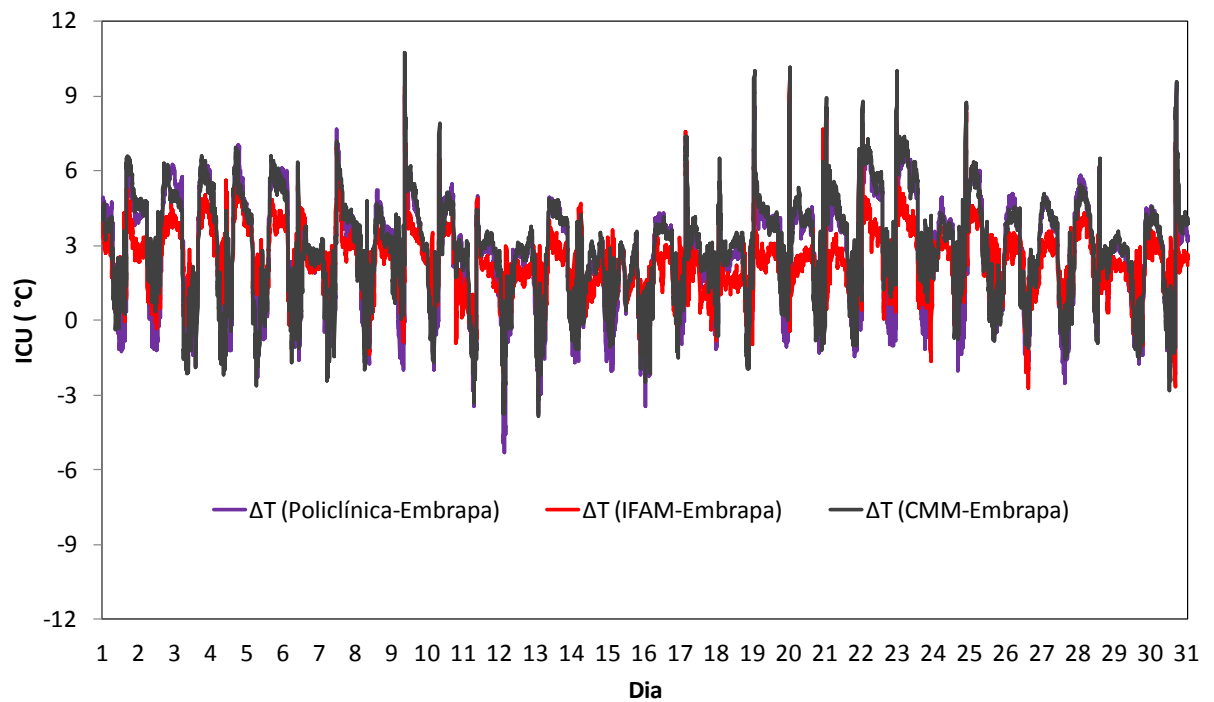


Figura 11. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de agosto de 2013.

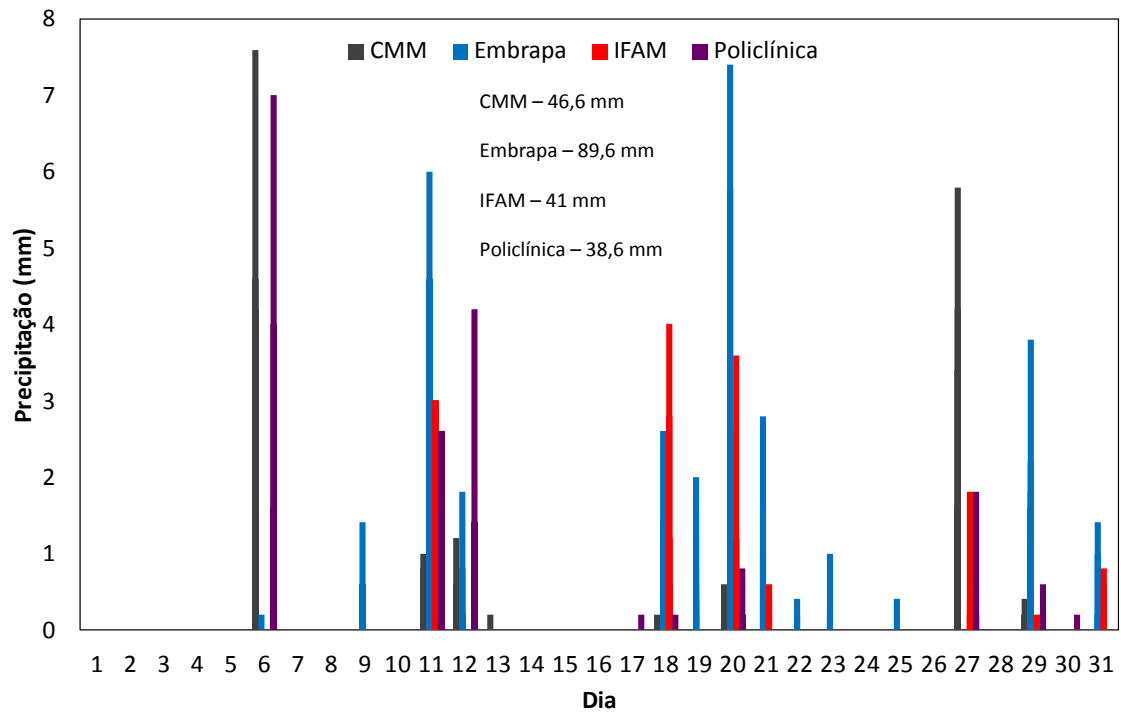


Figura 12. Variabilidade diária da precipitação a cada 5 minutos para o mês de agosto de 2013.

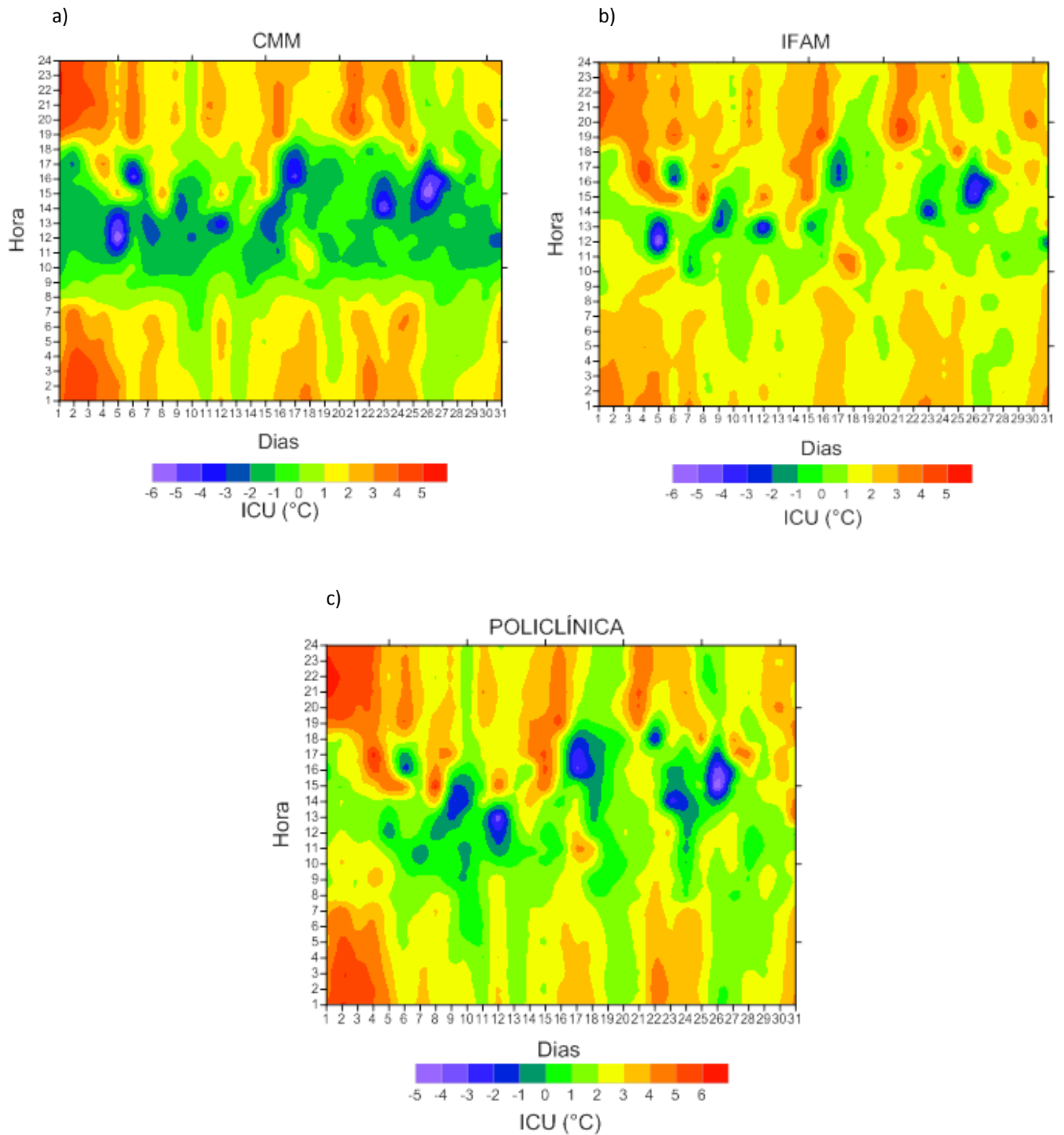


Figura 13. Comparação da média horária da ICU para o mês de agosto de 2013 entre as estações urbanas CMM (a), IFAM (b) e Policlínica (c) e a estação Embrapa (rural).

Para o mês que apresenta os maiores valores de temperatura do ar em Manaus (INMET, 2009), a ICU aumentou significativamente chegando a um valor de 10,0 °C no dia 10 (Figura 14). Conforme a Figura 15 não teve ocorrência de chuva entre os dias 15 e 19, nestes dias a ICU chegou a valores próximos a 7,0 °C. Observando um dia sem chuva em setembro, percebe-se que os maiores valores foram observados na madrugada (entre 1 e 4 horas da manhã) e à noite (19 a 24 horas) nas estações CMM e Policlínica (Figura 16 a, c), parecido como foi verificado em agosto. Essas análises indicam que a estação IFAM apresentou os menores valores de ICU em agosto e setembro. No entanto, a ICU pode aumentar drasticamente na estação IFAM durante o período da tarde podendo chegar a valores de até 8,0 °C (Figura 16 b), como foi observado nos dias 19 e 26.

De uma forma geral a ICU é mais intensa no período noturno e na madrugada para um dia sem ocorrência de chuva tanto na estação chuvosa quanto na estação menos chuvosa da região, porém em alguns dias no período da tarde podem-se observar altos valores, principalmente em agosto e setembro, meses considerados menos chuvosos e quentes na cidade. Fazendo uma comparação entre as estações que estão instaladas em altimetrias similares, CMM e EST em tripé e para altimetrias diferentes, como IFAM e Policlínica no telhado e INPA em uma torre micrometeorológica pode-se dizer que as estações localizadas na zona sul da cidade (CMM e Policlínica) apresentam maiores valores de ICU. Apesar de a estação Policlínica estar instalada em uma altura superior as demais (50 metros), a ICU nessa estação obteve maiores valores em relação a estações instaladas com uma altura inferior (EST, IFAM e INPA).

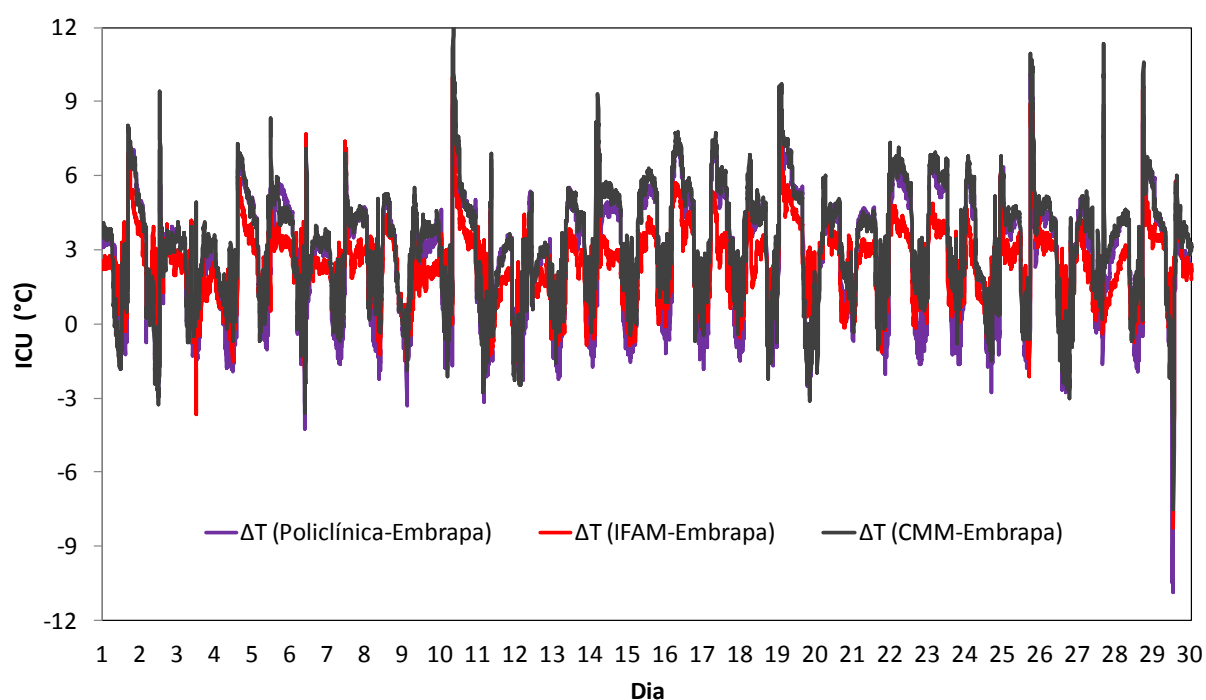


Figura 14. Variabilidade diária da ICU a cada 5 minutos para o mês de setembro de 2013.

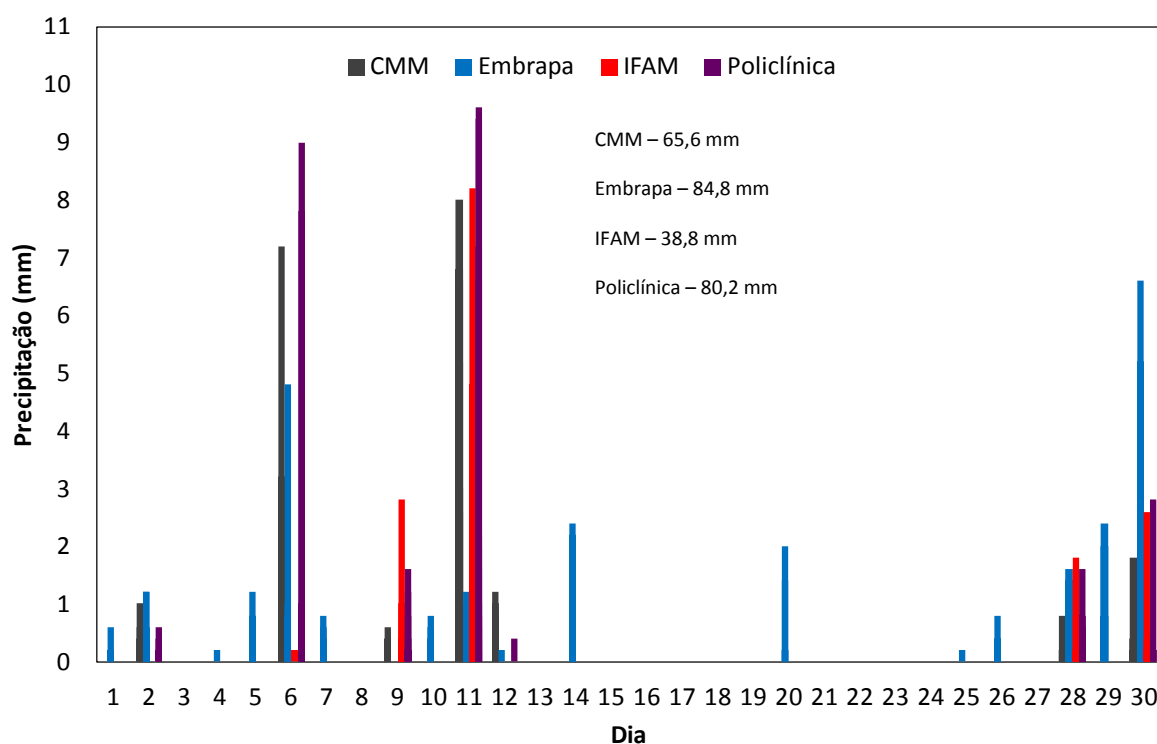


Figura 15. Variabilidade diária da precipitação a cada 5 minutos para o mês de setembro de 2013.

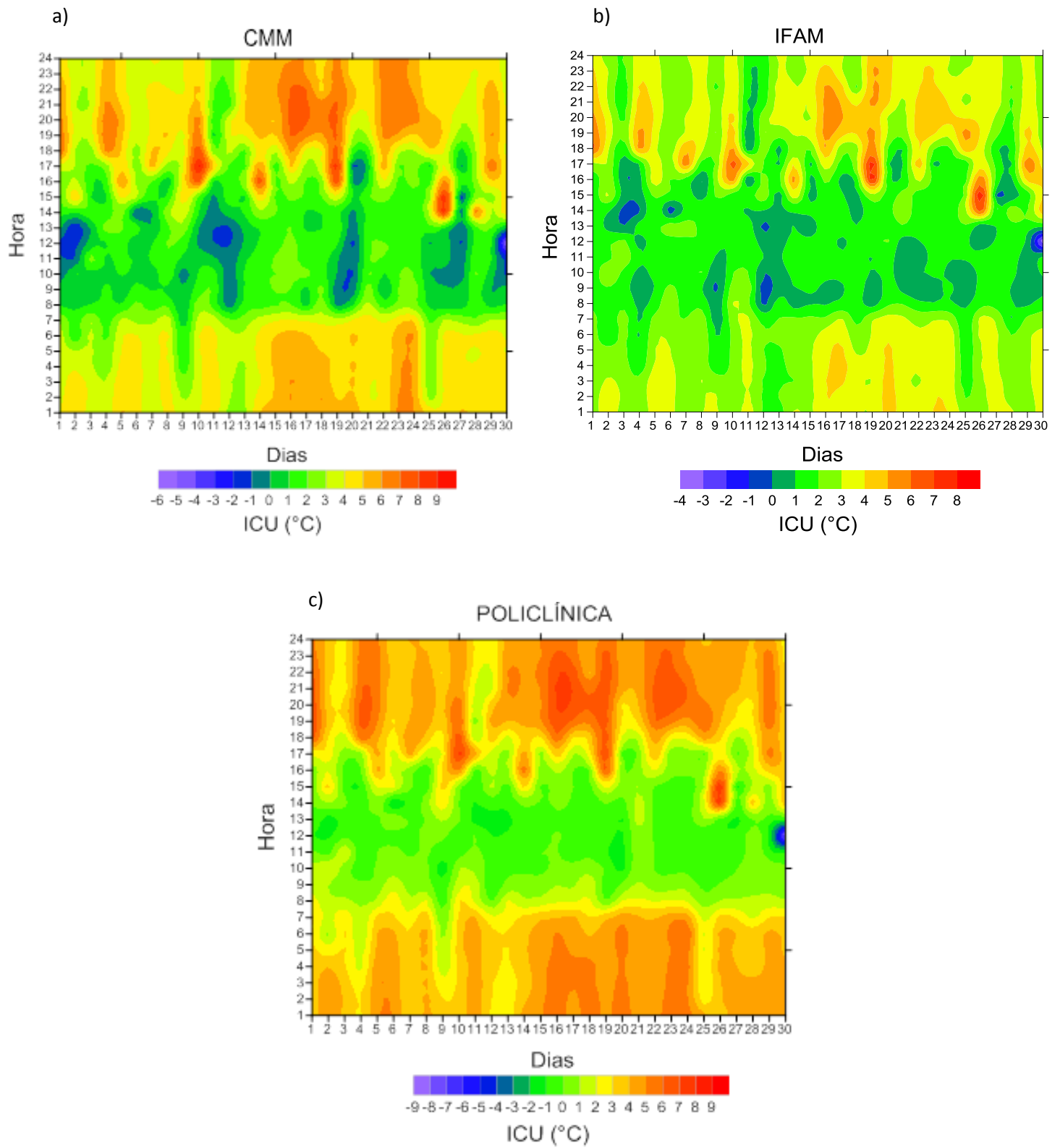


Figura 16. Comparação da média horária da ICU para o mês de setembro de 2013 entre as estações urbanas CMM (a), IFAM (b) e Policlínica (c) e a estação Embrapa (rural).

4.2 Intensidade da ilha de calor urbana (IICU) e Índice de Desconforto (ID)

Muitos estudos utilizam uma medida para quantificar ICU geralmente usando o termo Intensidade da ilha de calor urbana (IICU) (Souza e Alvalá, 2012; Arifwidodo e Tanaka, 2015), o qual pode ser obtido através da diferença da temperatura máxima ou média do ar entre a área urbana e rural (Equação 1). Assim, foram analisados os valores de IICU com relação aos valores diários da temperatura do ar para encontrar o gradiente de temperatura (ΔT) mensal entre as cinco estações urbanas e a estação rural para todo período de dados (Tabela 6).

Na Tabela 6 nota-se que $\Delta T(\text{urb-rural})$ médio na estação CMM apresentou os maiores valores de IICU nos meses que compreendem dados, sendo o maior valor verificado no mês de setembro (3,2 °C). O menor valor de IICU foi observado na estação INPA (0,4 °C), obtendo os menores valores na maioria dos meses avaliados. Com relação ao $\Delta T(\text{urb-rural})$ máximo, novamente a IICU apresentou a maior variação na estação CMM em quase todos os meses, somente não sendo observado em outubro e novembro de 2013. A variação do $\Delta T(\text{urb-rural})$ mínimo mostrou um comportamento bem irregular nos meses, apresentando a menor variação em diferentes estações.

Devido à série de dados se mostrar reduzida e incompleta, não foi possível avaliar o comportamento sazonal e anual da IICU. Porém, podem-se observar maiores (menores) valores em um mês do período menos chuvoso (chuvoso) da região, estando em concordância com os resultados obtidos por Souza e Alvalá (2012). Assim, a nebulosidade pode ser considerada como um dos fatores mais significativos no desenvolvimento da ICU.

Tabela 6. Gradientes térmicos mensais (ΔT) (em °C) entre as estações urbanas e rural (Embrapa) entre julho de 2013 a julho de 2014.

	CMM			EST			INPA			IFAM			Policlínica		
	méd	máx	mín	méd	Máx	mín	méd	máx	mín	méd	máx	mín	méd	máx	mín
Jul/2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	10,3	-7,6	2,3	10,0	-6,2
Ago/2013	2,9	10,7	-3,8	-	-	-	-	-	-	2,3	9,8	-2,7	2,6	9,5	-5,3
Set/2013	3,2	12,1	-7,5	-	-	-	-	-	-	2,4	10,1	-8,2	2,7	10,1	-10,9
Out/2013	2,8	10,0	-5,3	2,0	10,0	-7,2	-	-	-	2,2	10,4	-6,6	-	-	-
Nov/2013	1,9	10,6	-8,2	-	-	-	0,7	8,5	-8,4	1,2	11,8	-6,6	1,5	9,3	-8,8
Dez/2013	2,6	8,8	-8,0	1,8	8,3	-6,0	1,2	5,6	-8,5	-	-	-	2,2	7,2	-6,6
Jan/2014	2,3	9,3	-7,5	1,6	8,0	-7,9	0,8	5,4	-8,4	1,2	7,3	-9,3	1,7	6,8	-8,1
Fev/2014	1,8	9,2	-4,4	1,3	9,2	-4,8	0,4	6,5	-6,4	0,9	8,8	-6,6	1,2	8,3	-5,8
Mar/2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abr/2014	2,2	10,5	-5,2	1,5	9,9	-7,5	0,8	7,3	-6,8	-	-	-	1,7	9,7	-6,5
Mai/2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jun/2014	2,8	10,1	-5,5	2,0	8,7	-7,1	1,3	6,8	-6,1	-	-	-	-	-	-
Jul/2014	-	-	-	-	-	-	1,2	9,2	-10,1	-	-	-	-	-	-

Ter conhecimento das condições ambientais de conforto térmico é necessário porque muitas pessoas, especialmente aquelas que vivem em grandes cidades, sentem sensação de mal estar devido às altas temperaturas. Silva *et al.* (2010) mostraram a relação entre a ICU e os impactos sobre o ambiente térmico urbano na cidade de Campina Grande, localizada no nordeste brasileiro. Neste sentido, foi calculado o ID através do Índice de Temperatura Efetiva para obter valores médios mensais das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar para cidade de Manaus.

De acordo com os registros de temperatura e umidade relativa do ar nas Tabelas 7 e 8, todas as estações verifica-se condições de leve desconforto ($ID > 24,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), porém, a estação CMM mostrou uma condição bastante desconfortável em alguns meses com ID superior a $27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esses resultados estão parecidos com os encontrados por Azevedo *et al.* (2016) para áreas urbanas do semiárido brasileiro.

Tabela 7. Avaliação do índice de desconforto térmico (ID) (em $^{\circ}\text{C}$) durante julho a dezembro de 2013.

Estação	Jul/13	Ago/13	Set/13	Out/13	Nov/13	Dez/13
EMBRAPA	24,6	25,0	25,3	25,9	25,2	25,8
CMM	-	26,7	27,2	27,5	26,4	27,3
INPA	-	-	-	-	25,3	26,1
EST	-	-	-	27,1	-	26,9
IFAM	25,8	26,3	26,7	27,0	26,0	26,8
Policlínica	25,9	26,3	26,7	-	26,0	26,9

Tabela 8. Avaliação do índice de desconforto térmico (ID) (em °C) durante janeiro a julho de 2014.

Estação	Jan/14	Fev/14	Mar/14	Abril/14	Mai/14	Jun/14	Jul/14
EMBRAPA	25,2	24,7	-	25,2	-	25,2	25,2
CMM	26,6	26,0	26,2	26,6	26,5	27,0	-
INPA	25,3	24,7	25,0	25,4	25,4	25,8	25,7
EST	26,1	25,7	25,8	26,2	26,2	26,5	-
IFAM	25,9	25,4	25,6	-	-	-	-
Policlínica	26,1	25,4	25,7	26,2	-	-	-

Fazendo uma observação do ID para dois dias, um na estação seca e outro na estação chuvosa, para os períodos diurno e noturno, pode-se observar uma condição extremamente desconfortável no período diurno nos dois dias com valores de ID próximo a 27,0 °C em todas as estações no período menos chuvoso e na estação CMM e EST no período chuvoso (Tabela 9), sendo os maiores valores observados na estação CMM e IFAM, principalmente na estação seca. O período noturno apresentou ID superior a 24,0 °C nos dois dias, demonstrando situação de leve desconforto, embora na estação seca sejam verificadas condições altamente desconfortáveis nas estações CMM e Policlínica.

Entre todas as estações a que obteve os maiores valores de ID durante todo período estudado foi a CMM, localizada no centro da cidade, área com alta densidade de urbanização. A estação INPA obteve resultados parecidos com a estação rural, apesar de estar localizada na área urbana, esses valores similares podem estar relacionados com a extensa área vegetada próxima a estação INPA.

Tabela 9. Avaliação do índice de desconforto térmico (ID) (em °C) para o dia 19 de setembro de 2013 (a) e 20 de fevereiro de 2014 (b) durante o período noturno e diurno.

a)	Estação	Noturno	Diurno
	EMBRAPA	24,1	27,4
	CMM	27,5	28,9
	IFAM	26,3	29,2
	POLICLÍNICA	27,3	28,1

b)	Estação	Noturno	Diurno
	EMBRAPA	24,1	26,8
	CMM	25,5	27,6
	INPA	24,3	25,9
	EST	25,2	27,2
	IFAM	24,6	26,8
	POLICLÍNICA	25,1	26,6

4.3 Variabilidade espacial da temperatura da superfície

A capacidade dos sensores remotos para fornecer alta resolução espacial através de imagens térmicas é bastante útil para estudar os padrões espaciais e temporais da ICU na superfície em todas as regiões urbanas ao longo do tempo (Fernando, 2013). Entretanto, a cobertura temporal e a interpretação de dados de sensoriamento remoto são frequentemente restritas a horários específicos (de acordo com o tempo de passagem do satélite) e condições atmosféricas, como céu com poucas nuvens. Assim, a interpretação das imagens de satélite do presente estudo foi feita apenas para o período diurno para quatro dias do período menos chuvoso da região.

Quando as imagens de temperatura da superfície são analisadas para área de estudo nos quatro dias, observa-se que as áreas com altos valores de NDVI (áreas florestadas e vegetadas) têm claramente valores mais baixos de temperatura da superfície do que as áreas

urbanas (Figuras 17 e 18). Esse resultado está similar ao encontrado por Rafael (2014) que avaliou a distribuição espacial do NDVI em Manaus em quatro anos distintos (1990, 1997, 2003 e 2009). Outra pesquisa sugere que o aumento de temperatura da superfície da cidade de Manaus está diretamente relacionado com a diminuição nas áreas verdes (árvores) da cidade (Correa e Souza, 2012). Percebe-se então, uma relação inversamente proporcional entre a temperatura da superfície e o NDVI.

As estações localizadas na área urbana apresentaram temperaturas da superfície acima de 27,0 °C, enquanto que as temperaturas na estação rural variaram entre 24,0 a 27,0 °C, porém no dia 11 de setembro de 2015 foram observados valores próximos a 29,0 °C na estação rural (Figura 18 c). Em todas as imagens, as estações CMM, EST e Policlínica obtiveram os maiores valores de temperatura da superfície, isso pode ser justificado pelo fato dessas estações possuírem uma quantidade mínima ou inexistente de vegetação, como pode ser visto nas imagens de NDVI.

As imagens termais para os dois dias de julho mostraram uma variação de temperatura da superfície entre 23,0 °C e 32,0 °C, um valor próximo ao encontrado por Rafael (2014) para o dia 24 de julho de 2003 na mesma área de estudo. Em 2015, foram observadas as temperaturas de superfície mais altas, sendo o mês de setembro o que apresentou os valores mais elevados entre todas as imagens estudadas. Além disso, pode ser identificada uma maior concentração de focos de calor em todas as imagens, principalmente na área onde fica o distrito industrial da cidade.

De forma geral, a diferença da temperatura da superfície entre as estações urbanas e a estação rural ficou em torno de 2,0 - 4,0 °C, porém fazendo uma comparação com outros locais na área de estudo essa diferença pode ser ainda maior, confirmando assim a presença da ICU na cidade.

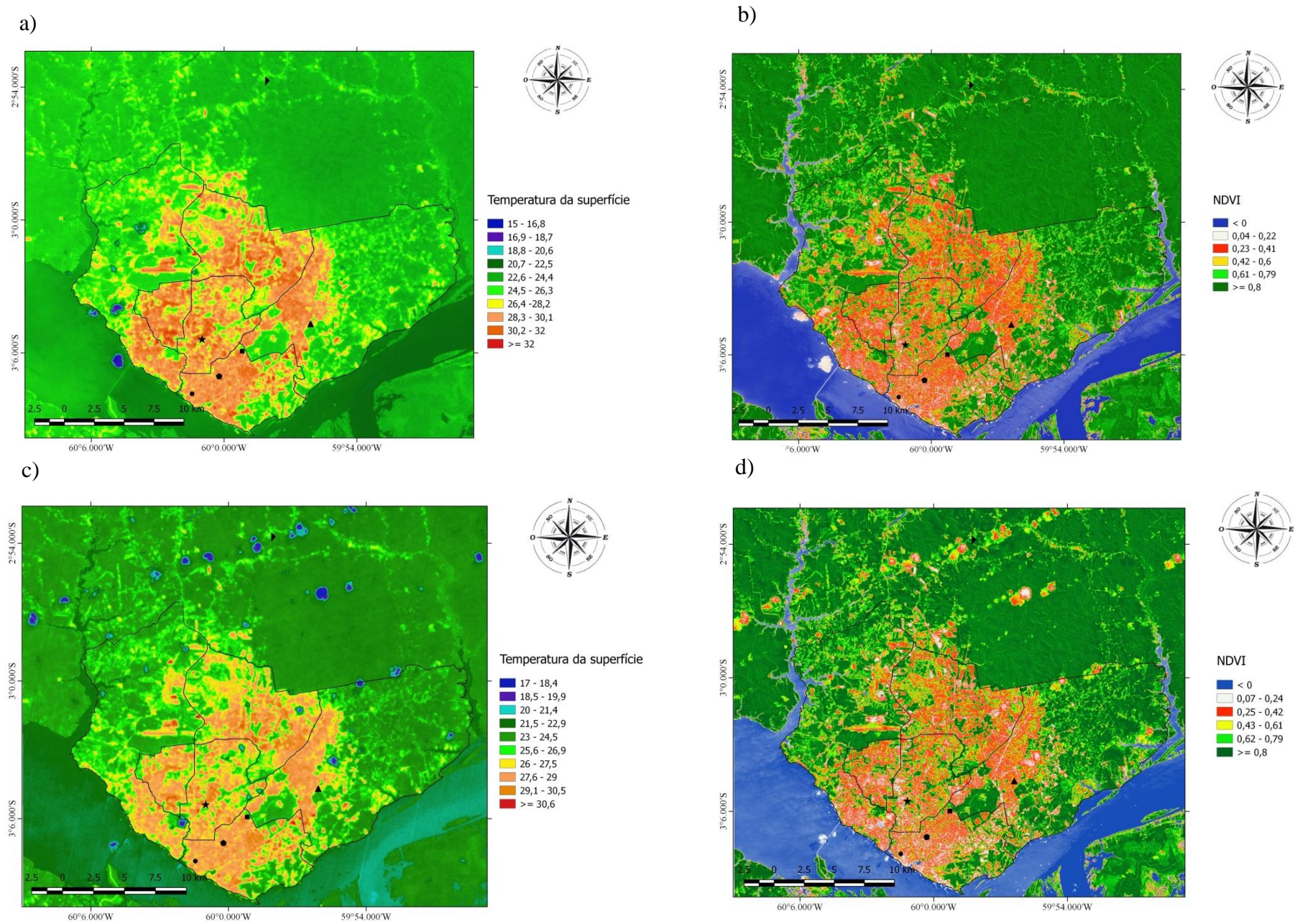


Figura 17. Distribuição espacial da temperatura da superfície (a), NDVI (b) para o dia 19 de julho de 2013, (c) e (d) para o dia 6 de julho de 2014 nas seis estações distribuídas na cidade e seu entorno. ► – Embrapa, ▲ – IFAM, ■ – INPA, ★ – EST, ● – Policlínica e ● – CMM.

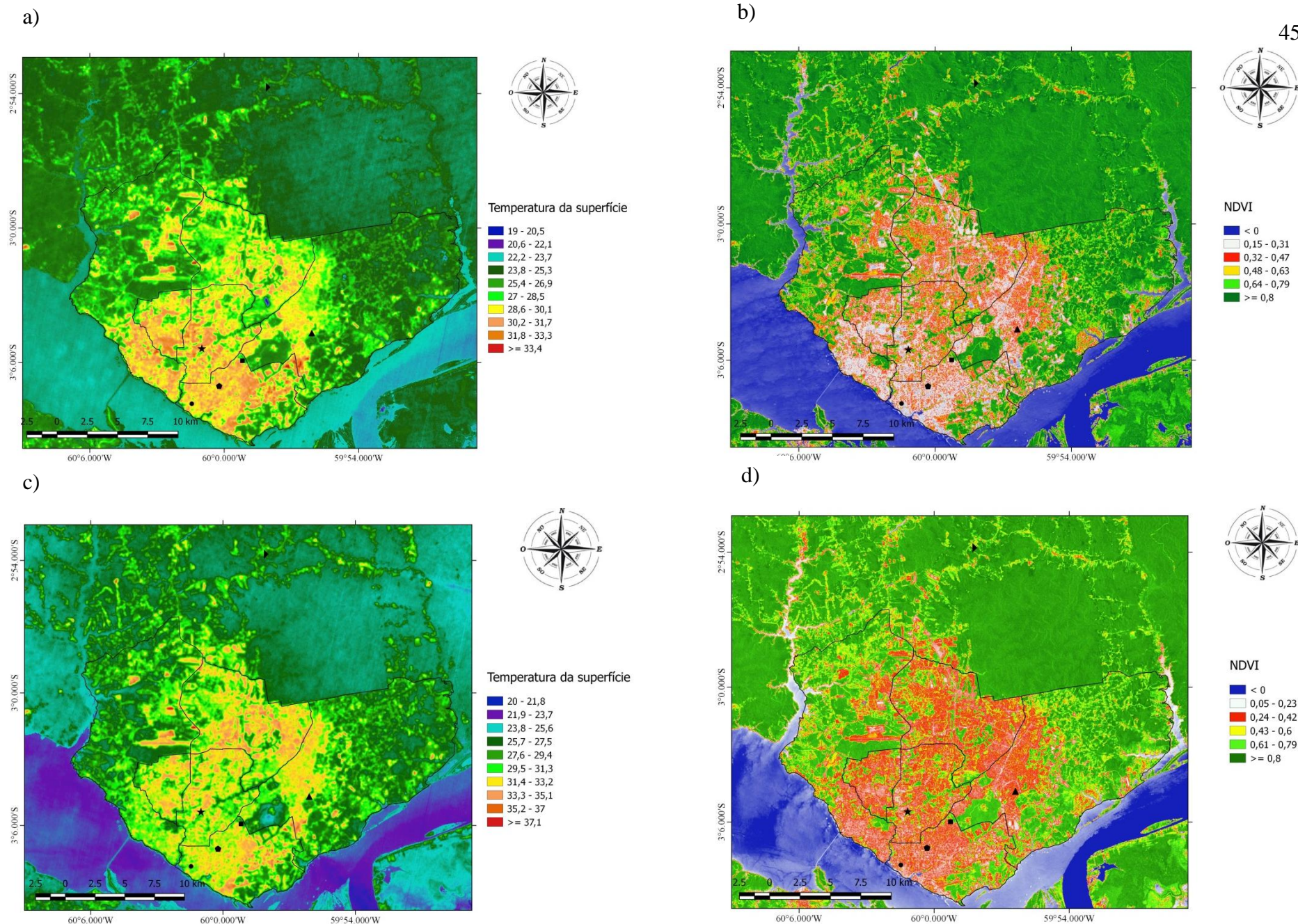


Figura 18. Distribuição espacial da temperatura da superfície (a), NDVI (b) para o dia 10 de agosto de 2015, (c) e (d) para o dia 11 de setembro de 2015 nas seis estações distribuídas na cidade e seu entorno. ► – Embrapa, ▲ – IFAM, ■ – INPA, ★ – EST, ● – Policlínica e ● – CMM.

5. CONCLUSÕES

Depois de investigar a variabilidade diária e horária da temperatura do ar e espacial através da temperatura da superfície nas seis estações distribuídas dentro cidade e no seu entorno ficou claro que existe uma característica de ICU em Manaus. A precipitação e a nebulosidade são fatores determinantes para avaliar a ICU atmosférica e na superfície em Manaus, tornando-se obstáculos na hora de fazer as análises. Neste caso, é recomendado que os estudos de ICU na cidade sejam realizados no período menos chuvoso da região, pois as magnitudes de ICU na estação menos chuvosa são frequentemente maiores do que as observadas durante a estação chuvosa.

Analizando a ICU atmosférica para um dia sem ocorrência de chuva, percebe-se que a maior diferença entre a temperatura do ar na área urbana e rural é mais significativa no período noturno e na madrugada, muitas vezes chegando a valores próximos a 6,0 °C em meses da estação menos chuvosa da região. Os resultados da IICU e do Índice de Desconforto mostraram que a ICU é mais intensa na estação CMM, podendo haver uma condição extremamente desconfortável para as pessoas nas áreas próximas a estação, principalmente no mês de setembro. A estação INPA apresentou os menores valores de IICU e Índice de Desconforto, mesmo estando localizada dentro da área urbana.

A partir da utilização das imagens de satélite foi possível avaliar a variação espacial da ICU em superfície. As áreas que apresentam NDVI baixo (alto) são as que se observam os maiores (menores) valores de temperatura da superfície. A diferença urbano-rural da temperatura da superfície nas estações estudadas ficou em torno de 3,0 °C, porém, em algumas partes da cidade, principalmente na região industrial, essa diferença é ainda maior. Nas estações CMM, Policlínica e EST foram verificadas as

maiores variações de temperatura da superfície. Esse resultado pode ser justificado pelas áreas comerciais, edifícios residenciais e pela escassa vegetação próximo desses locais.

Através deste estudo é possível afirmar que a combinação de medidas diretas (estações meteorológicas) e indiretas (sensoriamento remoto) pode ser usada para avaliar a variabilidade temporal e espacial da ICU atmosférica e em superfície, porém as medidas da temperatura da superfície por sensoriamento remoto possuem algumas limitações, como nuvens, aquisição dos dados em horários específicos, dentre outros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G., TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380-394, 2007.

ALMUTAIRI, M. K. Derivation of urban heat island for Landsat 8 TIRS Riyadh City (KSA). **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 3, p. 18-23, 2015.

ARIFWIDODO, G. A., TANAKA, T. The Characteristics of urban heat island in Bangkok, Thailand. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v.195, p. 423-428, 2015.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v.23, p. 1-26, 2003.

AZEVEDO, P. V., BEZERRA, P. T. C., LEITÃO, M. M. V. B. R., SANTOS, C. A. C. Characterization of human thermal comfort in urban areas of Brazilian semiarid. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n. 4, p. 371-380, 2015.

AZEVEDO, J. A., CHAPMAN, L., MULLER, C. L. Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations. **Remote Sensing**, v. 8, p. 1-17, 2016.

BARBOSA, R. G., DALLAROSA, R., SARAIVA, I. Características de um evento de precipitação ocorrido na cidade de Manaus-AM, associado à atuação da Zona de

Convergência de Umidade. **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém, Brasil, 2008.

CAVALCANTI, I. F. A., FERREIRA, N. J., SILVA DIAS, M. A. F., JUSTI, M. G. A. Tempo e Clima no Brasil, **Oficina de Textos**, 2009.

CHANDER, G., MARKHAM, B. Revised Landsat 5 – TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 41, p. 2674-2677, 2003.

CORAIOLA, G. C., TARGINO, A. C., KRECL, P., CHERNEV, L. M. Spatial-temporal distribution of the urban heat island in a tropical city during winter time. **XI Congreso Argentino de Meteorología**, Mendoza, Argentina, 2012.

CORRÊA, P. B. **Ilhas de calor na cidade de Manaus: aspectos observacionais e de modelagem**. 2013. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) – Universidade do Estado do Amazonas (UEA)/ Instituto de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, Amazonas.

CORREIA, F.W.S.; SOUZA, R.A.F.; **Ilhas de calor na cidade de Manaus: um estudo observacional e de modelagem numérica**. Manaus: UEA, 2012.

DWIVEDI, A., KHIRE, M. V. Measurement technologies for urban heat islands. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, p. 539-545, 2014.

EPA – Environmental Protection Agency’s Office of Atmospheric Programs. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**. p. 22, 2008.

FARIAS, H. S., BRANDÃO, A. M. P. M. O campo térmico como indicador de qualidade ambiental para políticas públicas: estudo de caso no bairro Maracanã/RJ. **Encontro da ANPPAS**, Brasília, Brasil, 2006.

FERNANDO, J. S. Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two, **CRS press/Taylor & Francis Group, LLC**, 2013.

GAMARRA, N. L. R., CORRÊA, M. P., TARGINO, A. C. Utilização de sensoriamento remoto em análise de albedo e temperatura de superfície em Londrina - PR: contribuições para estudos de ilha de calor urbana. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 537-550, 2014.

GOLDEREICH, Y. Standardized ground and top of canopy layer urban heat island partitioning on an airborne image. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, p. 247-255, 2006.

HART, M., SAILOR, D. J. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. **Journal Theoretical Applied Climatology**, v. 95, p. 397-406, 2008.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2015/estimativa_tcu.shtm, acessado em 16 de maio de 2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil: 1961-1990**. Brasília: MAPA, 2009. 465 p.

KAYA, S., BASAR, U. G., KARACA, M., SEKER, D. Z. Assessment of urban heat islands using remotely sensed data. **Ekoloji**, v. 21, p. 107-103, 2012.

KIM, Y., BAIK, J. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. **Journal of Applied Meteorology**, v. 44, p. 591–605, 2005.

KUMAR, K. S., BHASKAR, P. U., PADMAKUMARI, K. Estimation of land surface temperature to study urban heat island effect using Landsat ETM+ image.

International Journal of Engineering Science and Technology, v 4, p. 771-778, 2012.

LIU, L., ZHANG, Y. Urban heat island analysis using the Landsat TM data and ASTER data: a case study in Hong Kong. **Remote Sensing**, v. 3, p. 1535-1552, 2011.

MAIA, J. A., GONÇALVES, F. L. T. Uma análise do conforto térmico e suas relações meteorológicas na cidade de São Paulo. **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu, Brasil, 2002.

MAITELLI, G. T., WRIGHT, I. R. The climate of a riverside city in the Amazon Basin: urban-rural differences in temperature and humidity. In: John H C Gash; Carlos NOBRE, A., ROBERTS, J. M., VICTORIA, R. L. **Amazonian, Deforestation and Climate**. Londres: John Wiley & Sons, v. 1, p. 193-206, 1996.

MIRZAEI, P. A., HAGHIGHAT, F. Approaches to study urban island – Abilities and limitations. **Building and Environment**, v. 45, p. 2192-2201, 2010.

MONTEIRO, L. M., ALUCCI, M. P. Índices de conforto térmico em espaços abertos. Parte 1. **VIII Encontro Nacional e VI Encontro Latinoamericano de conforto no ambiente construído**. São Paulo. Anais. Maceió, ANTAC, 2005.

MOTA, M. A. S., NOBRE, C. A. Relação da variabilidade da Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) com a precipitação e a Alta da Bolívia durante a campanha “Wet-AMC/LBA”. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 344-355, 2006.

NGIE, A., AHMED, M. H. Assessment of urban heat island using satellite remotely sensed imagery: A review. **South African Geographical Journal**, DOI: 10.1080/03736245.2014.924864, 2014.

NOBRE, C. A., REID, J., VEIGA, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012.

OKE, T. R. **Urban environments**. In Surface of Canada, Bailey, W.G., T.R. Oke and W.R. Rouse, eds., McGill-Queen's University Press, Montréal, p. 303-327, 1997.

RAFAEL, R. A. **Relação entre ilhas de calor urbano e mudanças no uso da terra: um estudo de caso para Manaus – AM**. 2014. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba.

RICHARDSON, S. M. **A geospatial analysis of the urban heat island effect in Austin, TX**. 2015. Honor Thesis (Graduation) – Honor College, San Marcos, Texas.

SANTOS, C. A. C., LIMA, J. R. A. Análise dos efeitos da expansão urbana de Manaus - AM sobre parâmetros ambientais através de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, n. 1, p. 001-014, 2013.

SILVA, F. B., LONGO, K. M. Variabilidade temporal da ilha de calor urbana na região metropolitana do Rio de Janeiro. **XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Gramado, Brasil, 2012.

SILVA, V. P. R., AZEVEDO, P. V., BRITO, R. S., CAMPOS, J. H. B. C. Evaluating the urban climate of a typically tropical city of northeastern Brazil. **Environmental and Monitoring Assessment**, v. 161, p. 45-59, 2010.

SILVA, B. B., BRAGA, A. C., BRAGA, C. C., DE OLIVEIRA, L. M. M., MONTENEGRO, S. M. G. L., JUNIOR, B. B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images : application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 3-8, 2016.

SRIVANIT, M., HOKAO, K. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies : an application for the city of Bangkok, Thailand. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, p. 83-100, 2012.

SOUZA, D. O. **Influência da ilha de calor urbana das cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local**. 2012. Tese (Doutorado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo.

SOUZA, D. O., ALVALÁ, R. C. S. Um estudo da ilha de calor urbana de Manaus. **Boletim Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 34, 2010.

SOUZA, D. O., ALVALÁ, R. C. S. Observational evidence of the urban heat of Manaus City, Brazil. **Meteorological Application**. DOI: 10.1002/met.1340, 2012.

SUN, Q., TAN, J., XU, Y. An ERDAS image processing method for retrieving LST and describing urban heat evolution: a case study in the Pearl River Delta Region in South China. **Environmental Earth Sciences**, v. 59, p. 1047-1055, 2010

SUOMI, J., KÄYHKÖ, J. The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 451-463, 2012.

USGS - U.S. Geological Survey. **Landsat 8 data users handbook v. 2**. U.S. Geological Survey Landsat Project Science at the Earth Resources Observation and Science, LSDS-1574, 2016.

VAN HOVE, L. W. A., JACOBS, C. M. J., HEUSINKVELD, B. J., ELBERS, J. A., VAN DRIEL, B. L., HOLTSLAG A. A. M. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. **Building and Environment**, v. 83, p. 91-103, 2015.

VIRJI, J. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America from clouds winds. **Monthly Weather Review**, v. 109, p. 599-610, 1981.

VOOGT, J. A., OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 370-384, 2003.

WMO - World Meteorological Organization. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites.** WMO-No. 81, Geneva, 2006.

ZHOU, D., ZHANG, L., HAO, L., SUN, G., LIU, Y., ZHU, C. Spatiotemporal trends of urban heat island effect along the urban development intensity gradient in China. **Science of the Total Environment**, v. 544, p. 617-626, 2016